

Titre: Simulation en laboratoire de la filtration des moraines non plastiques
Title:

Auteur: Sébastien Lopez
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lopez, S. (1999). Simulation en laboratoire de la filtration des moraines non plastiques [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8571/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8571/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche:
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**SIMULATION EN LABORATOIRE DE LA
FILTRATION DES MORAINES NON PLASTIQUES**

SÉBASTIEN LOPEZ

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)**

SEPTEMBRE 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-48864-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

SIMULATION EN LABORATOIRE DE LA
FILTRATION DES MORAINES NON PLASTIQUES

présenté par : LOPEZ Sébastien

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SOULIÉ Michel, D.Sc.A., président

M. LAFLEUR Jean, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MONTÈS Pierre, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Mme LEITE Maria Helena, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Ce travail est l'aboutissement de nombreuses heures de travail durant lesquelles j'ai été aidé par plusieurs personnes. Je tiens donc à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté une aide quelconque dans la réalisation de cette recherche, plus particulièrement les personnes suivantes :

Monsieur Jean Lafleur ing. Ph D., pour m'avoir permis de faire une maîtrise et de réaliser ce projet et pour son encadrement tout au long du projet.

Monsieur Pierre Montès ing. Ph D., pour son encadrement et ses précieux conseils tout au long du projet.

Monsieur André Ducharme, technicien au laboratoire de géotechnique de l'École Polytechnique de Montréal, pour ses nombreux conseils, son soutien et son aide de tous les jours.

Monsieur Martin Bouthot ing. M. Sc. A., pour son aide immense en ayant préparé et assemblé le montage avec le filtramètre horizontal, pour avoir procédé à la calibration des appareils de mesure et pour m'avoir permis d'utiliser les schémas du montage qu'il avait dessinés.

L'ensemble des étudiants des cycles supérieurs de géotechnique de l'École Polytechnique de Montréal, pour leurs nombreux conseils, leur soutien et pour leur aide constante.

RÉSUMÉ

L'étude du comportement des barrages de la Baie James a montré certaines anomalies. L'une d'entre elles concerne la distribution des pertes de charge à l'intérieur du noyau du barrage qui montre une concentration élevée de pertes de charge à l'aval du noyau, près de l'interface noyau/filtre. Certaines hypothèses ont été émises pour expliquer cette distribution, l'une d'elles explique la distribution anormale de pertes de charge par la migration de particules fines dans le noyau et c'est cette dernière que nous allons tenter de vérifier. Cette étude est la troisième sur le sujet, après celles de Loungnarath (1996) et de Dulau (1997). Elle a pour but de confirmer que la moraine de LG4 est stable et de voir si la distribution anormale de pertes de charge peut être causée par la migration des particules fines du noyau.

Pour atteindre ces buts deux montages différents ont été utilisés. Le premier est le même que celui qui a été utilisé par Dulau, en utilisant ou non un piston sur le perméamètre. Le deuxième montage est beaucoup plus volumineux que l'autre et va permettre de faire des essais sous des conditions similaires à celles rencontrées en place. Avec ce deuxième montage on va tenter d'obtenir la même distribution de pertes de charge que celle observée à LG4 et voir si elle est le résultat d'une migration de particules fines de la moraine vers le filtre.

L'analyse des résultats porte surtout sur les distributions de pertes de charge et les analyses granulométriques. Les distributions de pertes de charge sont linéaires pour les quatre essais réalisés avec le petit filtramètre et le piston alors qu'on ne peut se fier aux distributions obtenues avec le petit filtramètre sans piston. En ce qui concerne les analyses granulométriques, que ce soit pour le filtramètre avec ou sans piston, on n'observe aucune variation notable entre les courbes granulométriques d'avant et après essai.

Avec le filtramètre horizontal il y a cinq essais qui ont été effectués. Les deux premiers ont permis d'apporter des modifications au montage qui ont donné des résultats intéressants pour les trois derniers essais. Lors de la première étape des essais 3 et 4 on a obtenu une distribution de pertes de charge comme celle observée au barrage principal de LG4, mais on n'arrivait pas à garder cette distribution lors des étapes subséquentes. Cela a été réussi lors de l'essai no. 5 en faisant plus d'étapes, de moindre durée, et en diminuant la valeur des incréments de pression. En ce qui concerne les analyses granulométriques, on n'a observé aucune variation entre les courbes granulométriques d'avant et après essai.

De ces analyses on peut en conclure que la moraine de LG4 est stable. De plus, grâce aux résultats obtenus avec le filtramètre horizontal on peut également conclure que la distribution anormale de pertes de charge observée à LG4 n'est pas le résultat de la migration de particules fines au sein du noyau. La cause de cette distribution anormale est donc ailleurs et pourrait être due à la présence d'air en plus grande quantité en aval du noyau qu'en amont. La question de l'air n'a été que brièvement abordée dans cette étude car ce n'en était pas le but et que le montage n'était pas non plus prévu pour ça.

ABSTRACT

Studies of the behavior of monitored dams in James Baie have shown some anomalies. One of them is head loss distribution in the core of the dam, which shows a high concentration of head loss in the downstream part of the core, near the interface core/filter. Some hypotheses have been made as potential reasons for the anomaly. One of these hypotheses believes that the anomaly is caused by the migration of fines particles (finer than 0.08 mm) within the core and toward the filter and will be the subject of this study which is the third about this subject, after those of Loungnarath (1996) and Dulau (1997). Its main objective is to confirm that the LG4 moraine is stable and to find if the abnormal distribution of head loss can be caused by the migration of fines particles of the core.

To achieve this we used two different settings. The first one is the same as Dulau used in his study with and without piston. The other setting is a lot bigger and will allow us to do the tests under the same condition as on the field. With this setting we will try to obtain the same abnormal head loss distribution as the one observed at the main LG4 dam, so we will be able to know if that distribution is the result of the migration of fines particles of the moraine.

The most important results are the sieve analysis and the head loss distributions obtained. The head loss distributions obtained with the little cell and the piston are linearly and the ones obtained without piston are judged unacceptable. As for the gradation curves, all the analysis made gave the same result, whether the tests were made with or without the piston : there is no variation between the gradation curves obtained before and after a test.

With the other setting, with the horizontal cell, five tests have been made. The first two helped us do some modifications to the setting and it gave good results for the tests made afterward. At the first step of the tests 3 and 4 we obtained the head loss distribution observed at LG4 but we lost it during the steps made after. Then went the fifth test where we kept the desired head loss distribution by raising the number of steps, who were less long, and by decreasing the value of the pressure increments. As for the sieve analysis, we again didn't observed any variation between the gradation curves obtained before and after a test.

From those results we can conclude that the LG4 moraine is stable and we can also say that the abnormal head loss distribution observed at the main dam of LG4 is not caused by the migration of particles. Therefore, there must be an other reason for this abnormal behavior of the dam. It could be the presence of air in a higher concentration in the downstream portion of the core than in the upstream portion. This was only barely approach in this study because it was not his objective and the setting was not equipped for this task.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SYMBOLES	xvii
LISTE DES ANNEXES	xix
 CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	 1
CHAPITRE 2 : THÉORIE ET RÉSULTATS ANTÉRIEURS	5
2.1 Suffosion et critère de stabilité	6
2.2 Critères de filtres	7
2.2.1 Critères de Terzaghi	7
2.2.2 Critères de Lafleur (1999)	8
2.3 Travaux antérieurs par Loungnarath (1996) et Dulau (1997)	12
CHAPITRE 3 : DESCRIPTION ET PROCÉDURES D'ESSAI	14
3.1 Essais au petit filtramètre	14
3.1.1 Description du montage	14
3.1.2 Matériaux utilisés	14

3.1.3	Procédures d'essai	15
3.1.3.1	Mise en place	15
3.1.3.2	Déroulement des essais	16
3.1.4	Programme	16
3.2	Essais au filtramètre horizontal	17
3.2.1	Description du montage	17
3.2.1.1	Filtramètre horizontal	17
3.2.1.2	Modifications apportées au montage original	20
3.2.1.3	Burettes instrumentées	22
3.2.1.4	Piézomètres et transducteurs de pression	23
3.2.1.5	Système d'acquisition de données	24
3.2.2	Matériaux utilisés	25
3.2.2.1	Base	25
3.2.2.2	Filtre	26
3.2.3	Procédures suivies lors d'un essai	27
3.2.3.1	Généralités	27
3.2.3.2	Saturation des céramiques poreuses et détermination de leur	
	Perméabilité	29
3.2.3.3	Préparation de la moraine	29
3.2.3.4	Préparation du filtre	30
3.2.3.5	Mise en place de la moraine	30
3.2.3.6	Mise en place du filtre	30

3.2.3.7 Mise en place des pointes des piézomètres	30
3.2.3.8 Fermeture	31
3.2.3.9 Déroulement d'un essai	31
3.2.3.10 Traitement des données	32
3.2.3.11 Démontage	32
3.2.4 Programme	35
CHAPITRE 4 : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	39
4.1 Petit filtramètre	39
4.1.1 Essais sans piston	39
4.1.2 Essais avec piston	44
4.2 Filtramètre horizontal	52
4.2.0 Reproductibilité des mesures piézométriques	52
4.2.1 Résultats des essais no. 1 et 2	53
4.2.2 Résultats de l'essai no. 3	54
4.2.3 Résultats de l'essai no. 4	62
4.2.4 Résultats de l'essai no. 5	67
4.2.5 Synthèse des distributions de pertes de charge	71
4.2.6 Analyses granulométriques	72

CHAPITRE 5 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	76
5.1 Conclusion	76
5.2 Recommendations	78
5.2.1 Petit filtramètre	78
5.2.2 Filtramètre horizontal	78
RÉFÉRENCES	79
ANNEXES	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques du compactage	15
Tableau 3.2	Caractéristiques de la base et du filtre lors de leur mise en place	17
Tableau 3.3	Conditions de mise en place avec le filtramètre horizontal	28
Tableau 3.4	Étapes pour le traitement des données	33
Tableau 3.5	Étapes de filtration	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Concentration des équipotentiellles, pertes de charge, près de l'interface noyau/filtre (d'après Verma et al. 1985)	3
Figure 2.1	Distribution théorique et observée des pertes de charge	5
Figure 2.2	Théorie de Kenney et Lau (1985)	7
Figure 2.3	Différents comportements selon le rapport de rétention (Lafleur 1999)	10
Figure 2.4	Organigramme pour le choix du filtre (Lafleur 1999)	11
Figure 3.1	Vue en élévation du filtramètre horizontal	18
Figure 3.2	Vue en coupe transversale du filtramètre horizontal	19
Figure 3.3	Photo du filtramètre horizontal	20
Figure 3.4	Vue en coupe d'un piézomètre	23
Figure 3.5	Schéma global du montage	25
Figure 3.6	Courbes granulométriques des filtres	26
Figure 3.7	Procédures suivies lors des analyses granulométriques	34
Figure 3.8	Cheminements des pressions	38
Figure 4.1	Distribution des pertes de charge pour l'essai S12F1-1	39
Figure 4.2	Distribution des pertes de charge pour l'essai S12F3-1	40
Figure 4.3	Variation de la perméabilité globale lors de l'essai S12F1-1	41
Figure 4.4	Variation de la perméabilité globale lors de l'essai S12F3-1	42
Figure 4.5	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F1-1	43

Figure 4.6	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F1-2	43
Figure 4.7	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F3-2	44
Figure 4.8	Distribution des pertes de charge pour l'essai PS12F1-1	45
Figure 4.9	Distribution des pertes de charge pour l'essai PS12F3-1	46
Figure 4.10	Variation de la perméabilité globale pour l'essai PS12F1-1	47
Figure 4.11	Variation de la perméabilité globale pour l'essai PS12F3-1	47
Figure 4.12	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F1-1	49
Figure 4.13	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F1-2	49
Figure 4.14	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F3-1	50
Figure 4.15	Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F3-2	50
Figure 4.16	Excès ou déficit de particules dans le filtre fin	51
Figure 4.17	Excès ou déficit de particules dans le filtre grossier	51
Figure 4.18	Distribution type des pertes de charge lors des essais no. 1 et 2	53
Figure 4.19	Distribution des pertes de charge pour un écoulement en sens inverse	54
Figure 4.20	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 5	55
Figure 4.21	Variation des perméabilités lors de la première étape	56
Figure 4.22	Variation des perméabilités lors de la cinquième étape	56
Figure 4.23	Variation du volume total d'eau dans les burettes pour l'étape 1	57
Figure 4.24	Variation du volume total d'eau dans les burettes pour l'étape 5	58
Figure 4.25	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 5 à 8	59
Figure 4.26	Variation des perméabilités pour l'étape 8	59

Figure 4.27	Variation du volume total d'eau dans les burettes	
	pour les étapes 6 à 8	60
Figure 4.28	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 14 à 16	61
Figure 4.29	Graphique typique de la perméabilité globale pour les étapes 14 à 16 ..	61
Figure 4.30	Variation de la distribution des pertes de charge lors de la 1^{ère} étape ...	62
Figure 4.31	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 5	63
Figure 4.32	Variation des perméabilités lors de la première étape	64
Figure 4.33	Variation des perméabilités lors de la cinquième étape	64
Figure 4.34	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 5 à 8	65
Figure 4.35	Variation des perméabilités lors de la huitième étape	66
Figure 4.36	Comparaison entre les étapes 9 à 12 et 1 à 5	66
Figure 4.37	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 17	68
Figure 4.38	Variation des perméabilités lors de la première étape	69
Figure 4.39	Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 18 et 19	70
Figure 4.40	Variation des perméabilités lors de l'étape 19	70
Figure 4.41	Comparaison des essais 3, 4 et 5 avec la sortie à l'air libre	72
Figure 4.42	Courbes granulométriques de l'essai no. 2	73
Figure 4.43	Courbes granulométriques de l'essai no. 3	74
Figure 4.44	Courbes granulométriques de l'essai no. 4	74
Figure 4.45	Excès ou déficit de particules dans le filtre fin	75
Figure 4.46	Excès ou déficit de particules dans le filtre grossier	75

LISTE DES SYMBOLES

$\%P_i$	pourcentage de perte de charge au capteur i
C_u	coefficient d'uniformité
D	diamètre de particule
d_i	diamètre correspondant à i% passant
d_I	diamètre indicatif
e	indice des vides
F1	filtre fin avec le petit filtramètre
F3	filtre grossier avec le petit filtramètre
FOS	«Filtration Opening Size», terme anglais pour O_F
FN1	filtre fin avec le filtramètre horizontal
FN3	filtre grossier avec le filtramètre horizontal
g	accélération gravitationnelle
i	gradient
I_D	indice de densité relative
k	perméabilité
k_B	perméabilité de la base
$\overline{k_B}$	perméabilité moyenne de la base
k_F	perméabilité du filtre
L_1	longueur de la base avec le filtramètre horizontal
L_2	longueur entre les deux interfaces avec le filtramètre horizontal

MP_I	moyenne de la pression mesurée juste avant l'interface, avec le filtramètre horizontal
MP_D	Moyenne des pressions juste avant et après l'interface diffuseur amont/base, avec le filtramètre horizontal
O_F	Ouverture de filtration
Δ_d	masse volumique du matériau sec
P_i	Pression au capteur i
Q	débit
R_R	rapport de rétention
T	temps
V	volume d'eau

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Résultats du petit filtramètre	83
ANNEXE B : Résultats de l'essai no.1 avec le filtramètre horizontal	92
ANNEXE C : Résultats de l'essai no. 2 avec le filtramètre horizontal	101
ANNEXE D : Résultats de l'essai no. 3 avec le filtramètre horizontal	110
ANNEXE E : Résultats de l'essai no. 4 avec le filtramètre horizontal	120
ANNEXE F : Résultats de l'essai no. 5 avec le filtramètre horizontal	128
ANNEXE G : Potentiel suffosif des bases selon Kenney et Lau (1986)	139

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Depuis longtemps, certains ouvrages font l'objet d'un programme d'instrumentation permettant d'en suivre le comportement dans le temps. Ceci permet de réagir rapidement dès l'apparition d'un comportement anormal potentiellement dangereux pour la sécurité de l'ouvrage et du milieu environnant. On observe principalement les déplacements horizontaux et verticaux et des éléments qui dépendent du type d'ouvrage mis en place. Dans le cas des barrages, il est de rigueur de connaître les pressions interstitielles à l'intérieur du noyau.

Le barrage principal de LG4 localisé sur la rivière La Grande à près de 1000 km au nord de Montréal, est un barrage de 125 m de hauteur et de 3800 m de longueur ayant un noyau en moraine compactée. Sa construction s'est étalée de mars 1979 à novembre 1981 et la mise en eau de mars 1983 à décembre 1983. L'observation de son comportement au moyen de piézomètres a montré à la fin de la mise en eau, une concentration de pertes de charge à l'aval du noyau, près de l'interface avec le filtre, ce qui est considéré comme une anomalie. Cette situation est représentée sur la figure 1.1.

Trois hypothèses ont été proposées pour expliquer cette anomalie.

1. La migration des particules

Cette hypothèse signifie qu'il y a déplacement des particules fines du sol au travers du squelette granulaire grossier de ce même sol, en l'occurrence le noyau. Ce déplacement de particules se fait de l'amont vers l'aval où les fines iraient colmater le filtre. Ainsi, la perte de particules fines en amont fait augmenter la perméabilité dans cette zone tandis que le gain de particules fines en aval fait diminuer la perméabilité en cet endroit.

2. L'air dissout

On sait qu'il y a présence d'air dans l'eau et dans les sols. Cet air peut être complètement ou partiellement dissout sous l'effet des pressions interstitielles et peut se détendre dans des zones de plus faible pression interstitielle. Cette hypothèse suggère qu'il y aurait des zones de plus faible pression interstitielle, donc présence de bulles d'air qui ont pour effet de diminuer la perméabilité dans ces zones. Pour expliquer l'anomalie, ces zones doivent se trouver à l'aval du noyau.

3. La consolidation différentielle

Cette hypothèse suggère une distribution non uniforme de l'indice des vides au travers du noyau du barrage. L'indice des vides serait de plus en plus faible de l'amont vers l'aval, ce qui a pour effet de diminuer la perméabilité dans la partie aval comparativement à la partie amont. Ceci serait causé lors de la mise en eau du barrage qui crée une poussée horizontale sur le noyau.

Ce travail constitue la suite des rapports publiés par Loungnarath et Lafleur (1996) et Dulau (1997), dont il sera question au prochain chapitre. Le but original de la présente étude est de vérifier la première hypothèse émise sur la migration des particules. Pour ce faire, on a effectué des essais de filtration sur de la moraine compactée en utilisant deux montages dont celui utilisé par Dulau. Dans un cas, l'essai se fait avec de la moraine reconstituée à 12% de fines, avec et sans piston, avec deux différents filtres, avec écoulement de haut en bas et à l'état saturé. Pour l'autre montage, on fait les essais avec la moraine naturelle, avec 27% de fines, avec aussi deux filtres différents, avec écoulement horizontal et en différentes étapes où l'on augmente les pressions appliquées au sol, en commençant à zéro, donc à un état non saturé. Les résultats sont ensuite analysés selon trois aspects : les lectures des capteurs, pour connaître la distribution des pertes de charge, les volumes d'eau entrant et sortant de l'échantillon, pour calculer le

débit et des analyses granulométriques pour vérifier s'il y a des variations entre les courbes granulométriques de la moraine et du filtre avant et après l'essai.

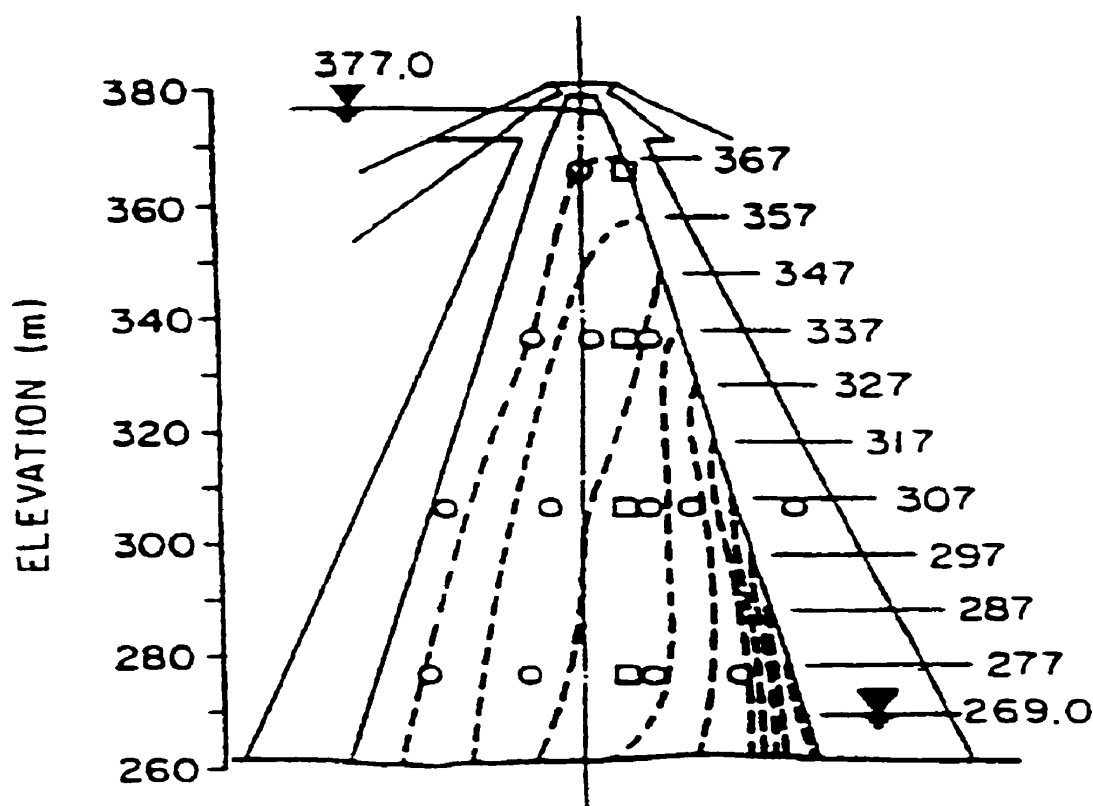


Figure 1.1 : Concentration des équipotentiels, pertes de charge, près de l'interface noyau/filtre (d'après Verma et al. 1985)

Le deuxième chapitre présente les principales théories concernant les essais réalisés ainsi qu'un bref retour sur les essais réalisés par Loungnarath et Dulau et les conclusions qu'ils ont tirées. Le troisième chapitre décrit les montages utilisés, les bases et les différents filtres employés avec chaque montage, de même que les procédures suivies pour la réalisation des essais sur les deux montages. Il y a également une section sur le

traitement des données recueillies lors des essais. Le quatrième chapitre présente les principaux résultats obtenus, de même que l'analyse de ceux-ci. Finalement ce rapport se termine par une conclusion et des recommandations.

CHAPITRE 2

THÉORIE ET RÉSULTATS ANTÉRIEURS

Dans ce chapitre il sera question des principaux aspects théoriques en relation avec les essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche. La distribution des pertes de charge devrait être uniforme et linéaire, lorsque l'on fait passer un écoulement d'eau, dans un sol homogène. Au barrage principal de LG4, on n'a pas observé cette distribution dans le noyau. On a plutôt eu une concentration de pertes de charge en aval du noyau, près de l'interface avec le filtre, ce qui suscite bien des interrogations. Le but de ce travail est de répondre en partie à ces interrogations. La figure ci-dessous schématise les cas théorique et observé de distribution de pertes de charge.

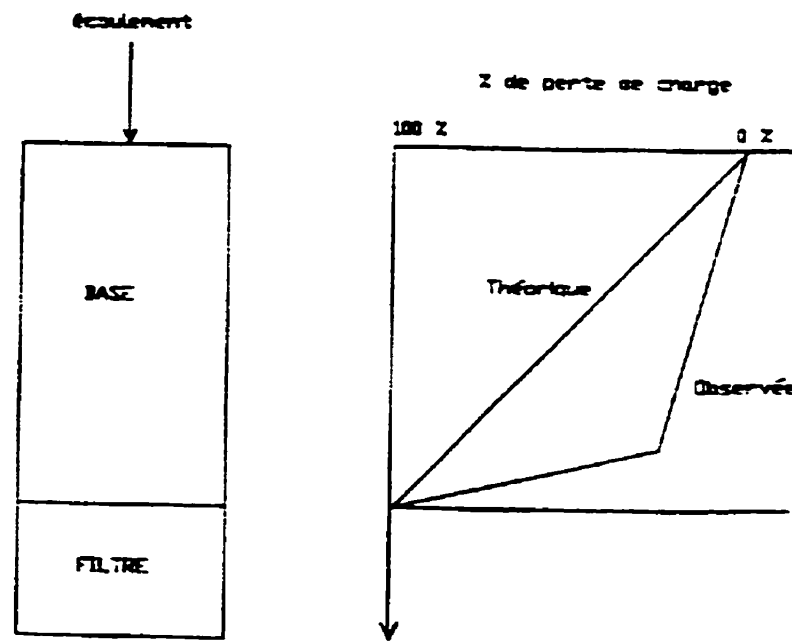


Figure 2.1 : Distribution théorique et observée des pertes de charge

2.1 Suffosion et critère de stabilité

La suffosion se définit comme la migration des particules fines d'un sol à l'intérieur du squelette formé par les particules grossières de ce même sol, sous l'action des forces d'écoulement. Dans le cas qui nous intéresse, le sol en question est le noyau du barrage constitué de moraine compactée. Ainsi, un sol permettant la migration de particules fines est un sol dit suffosif ou instable.

Kenney et Lau (1985) ont développé une procédure permettant de dire si un sol est stable ou non en se servant de la courbe granulométrique du sol en question. Il s'agit de tracer le graphique de H vs F où H est fonction de F . La variable F est le pourcentage passant correspondant à un diamètre de particule D ; on lit ensuite le pourcentage (X) correspondant à un diamètre de $4D$. La variable H prend alors la valeur de la différence entre X et F , tel que montré sur la figure 2.2.

Cette procédure a été vérifiée en comparant sur la base des variations granulométriques des sols stables et instables, ce qui a permis de délimiter les zones de la figure 2.2. Ils ont établi que les limites de stabilité sont comprises entre la droite $H = 1.3 F$ et la droite $F = 0.2$. Ces limites de stabilité ont été modifiées (voir Kenney et Lau, 1986) et sont alors comprises entre la droite $H / F = 1$ et la droite $F = 0.2$.

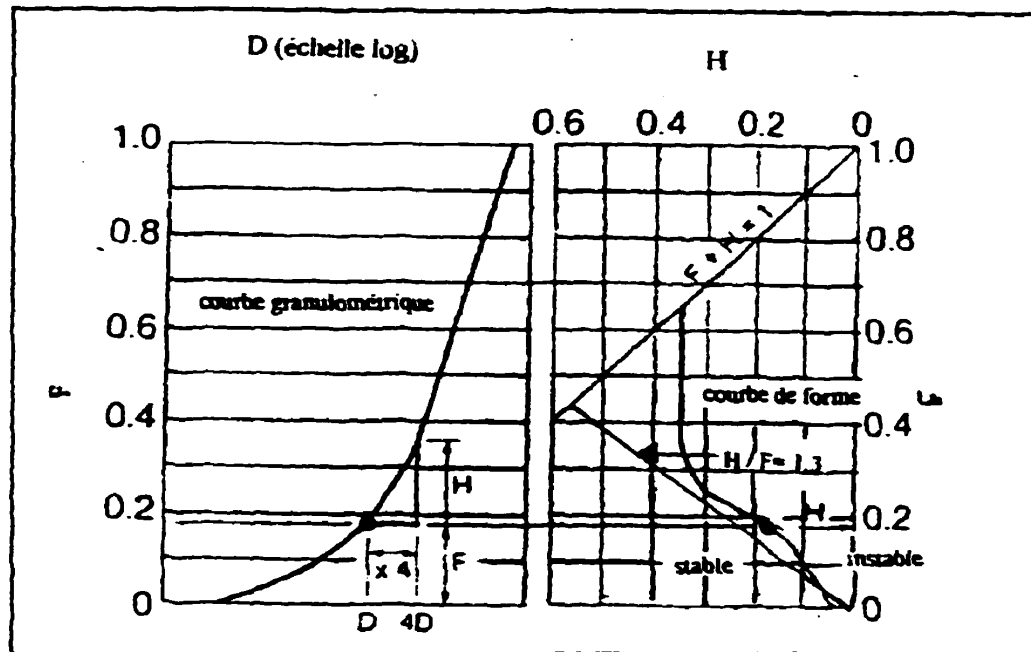


Figure 2.2 : Théorie de Kenney et Lau (1985)

2.2 Critères de filtres

Plusieurs critères ont été établis de façon à choisir un filtre approprié pour la base à protéger. Il y a ceux établis par Terzaghi en 1922 et ceux développés par Lafleur (1999).

2.2.1 Critères de Terzaghi

Les critères de Terzaghi établis empiriquement pour des sols à granulométrie uniforme, sont applicables pour la sélection de filtre selon les matériaux à protéger (bases). Les deux principaux critères sont les suivant :

- 1- Les vides du filtre devront être suffisamment petits pour empêcher les particules de la base d'y pénétrer, de le colmater et d'entraver son bon fonctionnement (critère de rétention).

Formulation mathématique :
$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4$$

- 2- Le matériau composant le filtre doit être plus perméable que le matériau (base) à protéger pour empêcher tout excès de pression hydraulique susceptible de mettre en danger la stabilité interne du filtre et l'intégrité des structures avoisinantes (critère de perméabilité).

Formulation mathématique :
$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 5$$

- D_i indique les diamètres du matériau du filtre
- d_i indique les diamètres du matériau de la base

2.2.2 Critères de Lafleur (1999)

Ces critères permettent de tenir compte du risque de suffosion et sont définis selon un paramètre appelé rapport de rétention, R_R , qui est le rapport entre l'ouverture de filtration du filtre (O_F) et le diamètre indicatif de la base (d_i). D'où

$$R_R = \frac{O_F}{d_i}$$

Ainsi, selon la valeur de R_R obtenue, l'un ou l'autre des trois comportements décrits ci-dessous, et qui sont représentés sur la figure 2.3, devrait avoir lieu.

- $R_R \gg 1$: lessivage complet (piping). Le sol (base) est lavé de ses particules fines, ce qui en fait augmenter la perméabilité moyenne jusqu'à celle du filtre.

- $R_R \approx 1$: pontage (bridging). Le sol (base) est lavé de ses particules fines près de l'interface base/filtre puis il y a stabilisation. Ceci fait augmenter la perméabilité locale de la couche juste au-dessus du filtre et fait augmenter légèrement la perméabilité moyenne de l'échantillon. C'est le cas d'une base non suffosive.

- $R_R \ll 1$: colmatage externe (blinding). Les particules fines ont migré sous l'effet des forces d'écoulement. Toutefois, étant donné que l'ouverture de filtration du filtre est beaucoup plus petite que le diamètre indicatif de la base, alors les particules fines sont retenues à l'interface base/filtre. Ceci a pour effet de former un cake à cet endroit, ce qui va entraîner la diminution de la perméabilité locale dans cette couche et faire chuter la perméabilité moyenne de cet échantillon puisque c'est cette couche qui prend alors le contrôle de l'écoulement. C'est le cas d'une base suffosive.

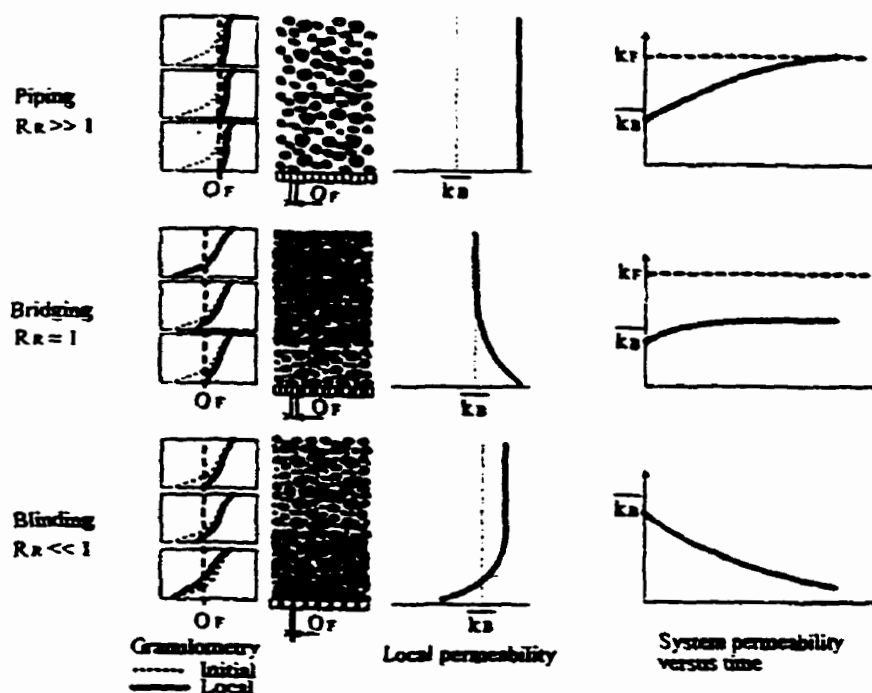


Figure 2.3 : Différents comportements selon le rapport de rétention (Lafleur 1999)

Pour calculer le rapport de rétention (R_R), on a besoin de O_F et de d_l . Dans le cas de filtre granulaire, on prend généralement $O_F = D_{15} / 9$ mais ici on prendra plutôt $O_F = D_{15} / 4$ de façon à tenir compte d'un facteur de sécurité de 2.25 vis-à-vis le lessivage. Pour les filtres géosynthétiques, on a $O_F = O_{95}$, où O_{95} est obtenu par tamisage hydrodynamique. On peut ensuite déterminer le diamètre indicatif de la base (d_l) à l'aide de la figure 2.4, qui permet de choisir d_l selon les caractéristiques intrinsèques de la base pour ensuite pouvoir choisir le filtre.

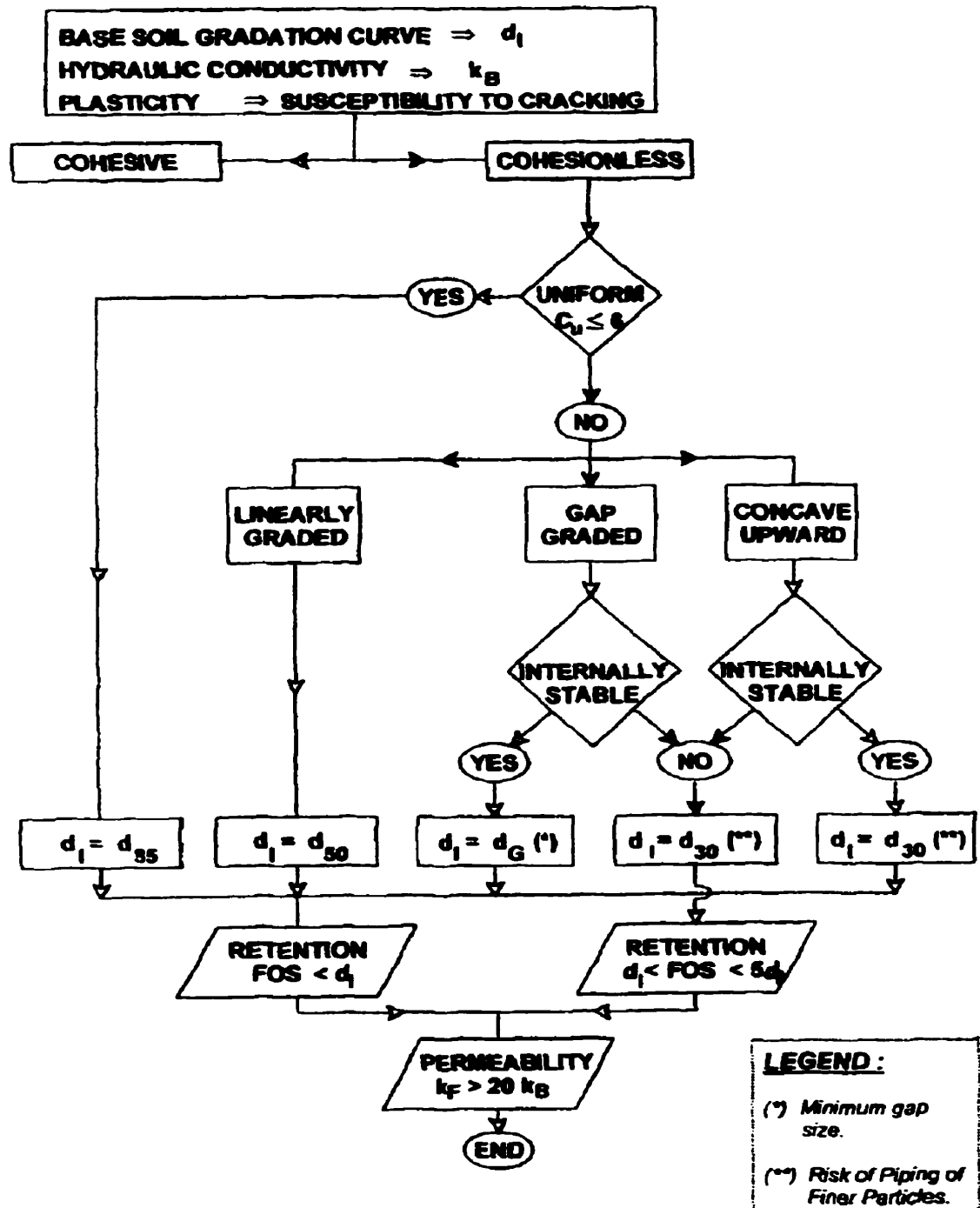


Figure 2.4 : Organigramme pour le choix du filtre (Lafleur 1999)

2.3 Travaux antérieurs par Loungnarath (1996) et Dulau (1997)

Plusieurs rapports ont été produits pour le projet d'Hydro-Québec concernant la distribution anormale de pertes de charge observée à LG4. L'objectif général de ce projet est de vérifier si la suffosion pouvait être responsable des anomalies de pression observées au barrage principal de LG4. Le premier a été celui de Loungnarath et Lafleur, (1996), qui a porté sur des essais dans un perméamètre à paroi rigide sur de la moraine reconstituée avec un pourcentage de particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) variant entre 4 et 28 %, compactée à la teneur en eau optimum. L'écoulement se faisait vers le bas et il y avait un papier-filtre comme filtre à l'aval de l'échantillon de moraine.

Les résultats obtenus sont les suivants.

Pour les sols avec un pourcentage de fines égal ou inférieur à 11 % :

- concentration des pertes de charge à l'aval ;
- les analyses granulométriques montrent une augmentation de fines dans la tranche la plus à l'aval : il y a suffosion.

Pour les sols avec un pourcentage de fines supérieur ou égal à 19 % :

- pas de concentration de perte de charge à l'aval ;
- il n'y a pas de suffosion.

En extrapolant ces résultats, on a conclu qu'il n'y avait pas de risque de suffosion dans la moraine de LG4 dont le pourcentage de fines est de 27 %.

Par la suite, le rapport de Dulau (1997) fait état des essais de filtration avec le même perméamètre que Loungnarath, avec quelques modifications, en utilisant de la moraine compactée et reconstituée avec 6 et 12 % de fines. Les principales modifications sont l'introduction d'un filtre granulaire plutôt que d'un papier-filtre et l'ajout d'un piston dans le haut du perméamètre. Le piston permet de suivre le mouvement du sol dans le perméamètre, si celui-ci s'affaisse, de façon à ce qu'il y ait toujours contact entre le piston et le haut du sol. Des essais ont donc été faits avec et sans piston, avec écoulement vers le haut et vers le bas, avec un filtre fin et un filtre grossier et en compactant la moraine à la teneur en eau optimum.

Les résultats obtenus n'ont montré aucune variation granulométrique entre les tranches, et ce, quelque soit le pourcentage de fines. On a aussi constaté qu'il n'y a jamais eu concentration de pertes de charge à l'interface base/filtre.

En combinant les résultats de ces deux mémoires, tel qu'écrit dans Dulau (1997), on conclut que :

- la moraine employée à LG4 est stable ;
- la suffosion n'est pas la cause de la concentration des pertes de charge à l'aval du noyau de LG4.

Une partie des essais dans le cadre du présent mémoire ont été réalisés avec le même appareil que Dulau et avec 12 % de fines, de façon à dupliquer les résultats. L'autre partie porte sur un montage de plus grande dimension de façon à reproduire plus fidèlement les conditions de chantier.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION ET PROCÉDURES D'ESSAI

3.1 Essais au petit filtramètre

3.1.1 Description du montage

Une partie des essais a été réalisée à l'aide du même perméamètre que celui utilisé par Dulau (1997), qui sera identifié comme le petit filtramètre pour le reste du rapport. Les procédures sont également les mêmes de façon à faire les essais sous les mêmes conditions. La seule différence est que lors des essais avec le piston on a mis une masse de 20 kg, qui équivaut à une contrainte de 10.5 kPa, au lieu de 3 kPa avec Dulau.

3.1.2 Matériaux utilisés

Les filtres testés sont les mêmes que ceux de Dulau. Pour la base on a utilisé seulement la moraine reconstituée à 12 % de particules fines. Les courbes granulométriques de la base et des filtres sont présentées avec les résultats des analyses granulométriques au chapitre 4 (section 4.1). L'ouverture de filtration des filtres (O_F) s'obtient en prenant $O_F = D_{15}/4$. Pour le filtre fin (F1) on a donc $O_F = 0.038$ mm et pour le filtre grossier (F3) on a $O_F = 0.40$ mm. Le diamètre indicatif de la base (d_I) s'obtient en prenant $d_I = d_{50}$, on a donc $d_I = 0.38$ mm. La vérification du critère de stabilité de Kenney et Lau vous est présentée à l'annexe G, selon ce critère la moraine reconstituée à 12% de fines est stable.

3.1.3 Procédures d'essai

3.1.3.1 Mise en place

Il faut d'abord mettre le sol dans le filtramètre (voir le tableau 3.1 pour les caractéristiques des couches de compactage). Ces valeurs ont été déterminées à partir du mémoire de Loungnarath et des notes de Dulau. Le filtre est mis en place à sec légèrement compacté.

Tableau 3.1 : Caractéristiques du compactage

Couche	Masse (gr)	Nombre de coups
1	1690	8
2	1550	11
3	1510	11
4	1480	14
5	1370	14
6	960	15
7	1060	15
8	1100	16
9	**	17

** Cette quantité varie à chaque fois, il faut mettre tout le sol nécessaire pour que la cellule soit remplie jusqu'en haut.

La saturation de l'échantillon se fait en appliquant une contre-pression de 600 kPa. Il faut également procéder à l'étalonnage des capteurs avant de les mettre en place lors du premier essai et vérifier cet étalonnage à la fin de chaque essai.

3.1.3.2 Déroulement des essais

Tous les essais ont été faits en une étape, avec écoulement descendant, sous un gradient de 10 et jusqu'à stabilisation des lectures des capteurs et du débit. Les essais ont été faits en discontinu car la capacité d'eau du système ne permettait pas de laisser l'écoulement la nuit. Il fallait également arrêter l'écoulement cinq à dix minutes de temps à autre, pour permuter les burettes. Durant les essais, on mesure les pressions interstitielles, les volumes d'eau entrant et sortant des burettes et le temps écoulé depuis le début à l'aide d'un système d'acquisition de données. Les valeurs mesurées sont enregistrées suivant différents cycles, définis ci-dessous :

- 1^{er} cycle : enregistrement aux 10 secondes pendant 1 minute;
- 2^e cycle : enregistrement aux 2 minutes pendant 1 heure ;
- 3^e cycle : enregistrement aux 10 minutes pendant 2 heures ;
- 4^e cycle : enregistrement aux 20 minutes pour le reste du temps.

À la fin de l'essai, on récupère le sol en tranches en séparant la base du filtre. On peut alors procéder à des analyses granulométriques.

3.1.4 Programme

Huit essais ont été réalisés avec le petit filtramètre, quatre sans et quatre avec le piston, deux avec chacun des filtres. On retrouve dans le tableau 3.2, les principales caractéristiques de la base et du filtre lors de leur mise en place pour tous les essais réalisés au petit filtramètre. La nomenclature est définie comme suit : lorsque le nom commence par un P, il s'agit d'un essai avec piston. Le terme S12 s'applique à tous les essais puisqu'ils ont tous été réalisés avec une base à 12% de fines. Le terme F1 ou F3 désigne respectivement le filtre fin ou le filtre grossier. Finalement le chiffre 1 ou 2 indique un premier ou une répétition d'un essai.

La charge appliquée sur le piston est de 20 kg, ce qui correspond à une contrainte de 10.5 kPa. Le piston va permettre d'assurer un contact continu entre le sol et le haut de la cellule, tout en appliquant une légère pression sur le sol, ce qui devrait empêcher le développement d'un écoulement préférentiel.

Tableau 3.2 : Caractéristiques de la base et du filtre lors de leur mise en place

ESSAI	BASE			FILTRE
	Teneur en eau (%)	Masse volumique (kg/m ³)	% Proctor standard	Masse volumique (kg/m ³)
S12F1-1	6.7	2043	98	1772
S12F1-2	6.7	2084	99	1772
S12F3-1	6.7	2056	98	1707
S12F3-2	6.7	2084	99	1718
PS12F1-1	6.7	1980	97	1772
PS12F1-2	6.7	2013	97.5	1761
PS12F3-1	6.7	1984	97	1707
PS12F3-2	6.7	1989	97	1707

3.2 Essais au filtramètre horizontal

3.2.1 Description du montage

3.2.1.1 Filtramètre horizontal

Il est présenté sur les figures 3.1 et 3.2, en élévation longitudinale et en coupe transversale respectivement. Il se compose d'un boîtier et d'un couvercle formés de plaques d'acier de 22 mm d'épaisseur. Des chicanes sont disposées sur les parois

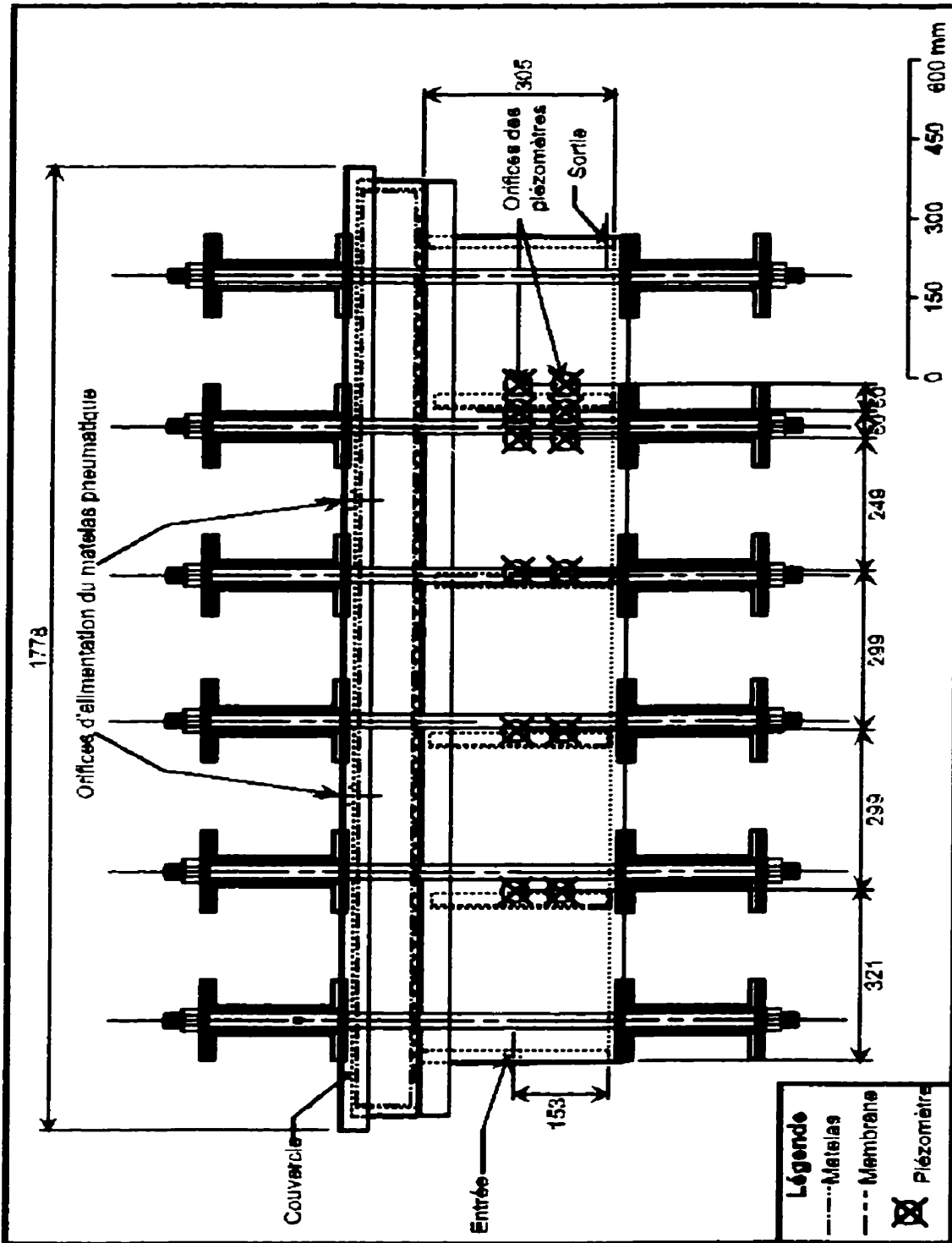


Figure 3.1 : Vue en élévation du filtramètre horizontal

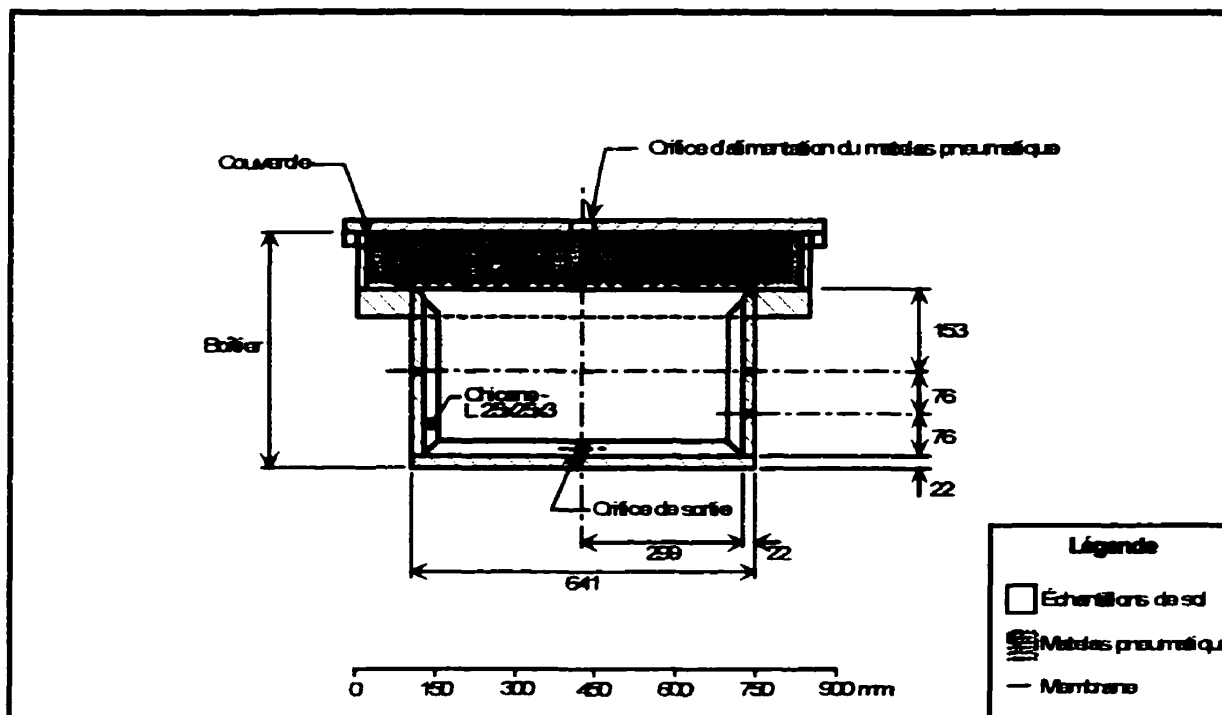


Figure 3.2 : Vue en coupe transversale du filtramètre horizontal

internes du filtramètre afin d'empêcher les écoulements préférentiels. Un joint d'étanchéité formé d'une membrane caoutchoutée de 3 mm d'épaisseur est disposé entre le couvercle et le pourtour du boîtier. Des poutres, au nombre de douze (six au-dessus et six au-dessous du filtramètre) et faisant toute la largeur du filtramètre, sont mises en place pour avoir un joint étanche entre le boîtier et le couvercle. Toutefois, suite à de nombreuses fuites, des boulons ont été ajoutés entre les poutres et sur toute la largeur des deux extrémités du filtramètre (voir fig. 3.3). Finalement, les parois verticales longitudinales comportent une rangée sur un côté, et deux sur l'autre, de six orifices filetés à travers lesquels sont insérés des piézomètres (voir section 3.2.1.3).

L'espace délimité par le boîtier et le couvercle du filtramètre peut être décomposé en deux compartiments (voir fig. 3.2). L'un d'eux contient les échantillons de sols et présente une section transversale de 305 mm par 597 mm. Les échantillons de moraine (base) et de filtre y ont respectivement une longueur de 1207 et 293 mm. L'autre

compartiment est occupé par un matelas pneumatique fait de néoprène et rempli d'eau, qui sert à appliquer des contraintes verticales de confinement sur le sol. Les deux compartiments sont isolés l'un de l'autre par une membrane de néoprène et des cordons de butyle disposés sur le rebord du filtramètre.

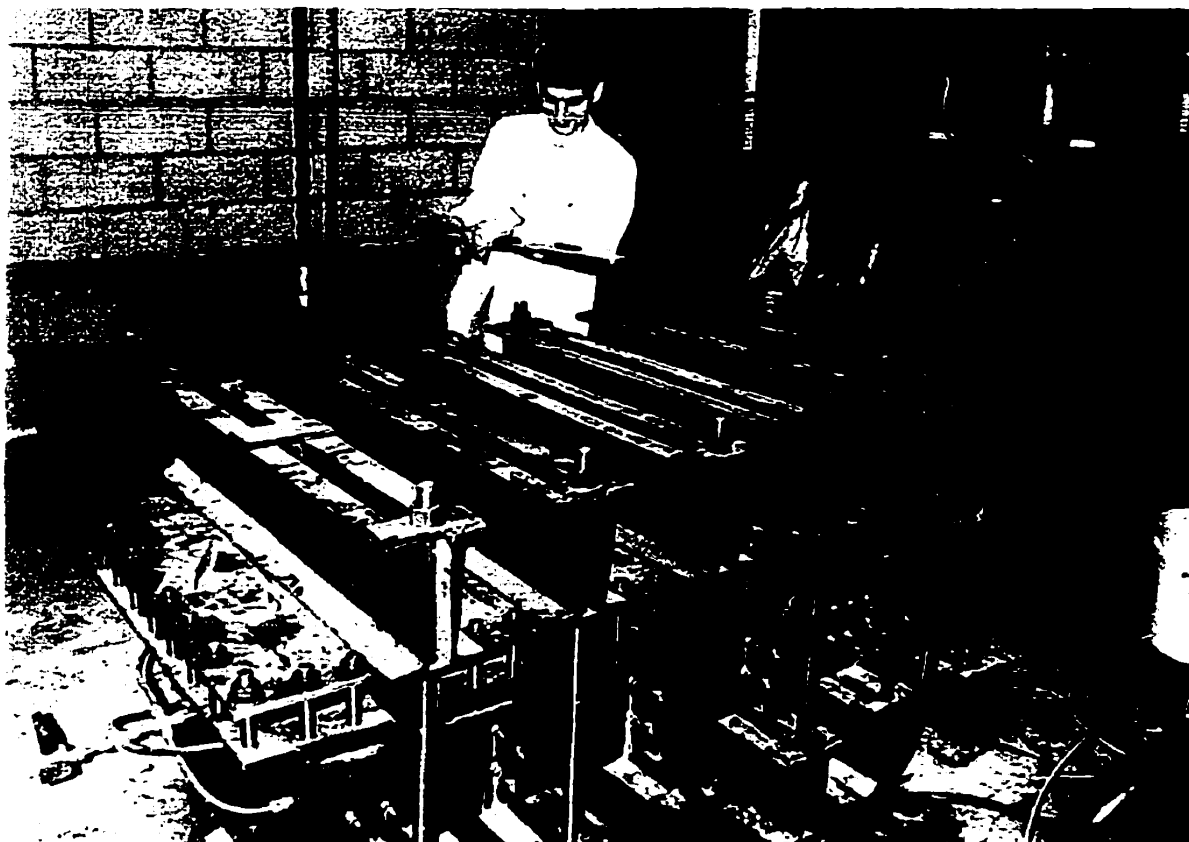


Figure 3.3 : Photo du filtramètre horizontal

3.2.1.2 Modifications apportées au montage original

Le programme a comporté cinq essais numérotés de 1 à 5. Les trois premiers (1, 2 et 3) ont servi à la mise au point du montage et ont comporté un certain nombre de modifications décrites ci-après.

Après l'essai no. 1, on a mis en place un système d'arrêt automatique permettant l'arrêt de l'écoulement lorsque l'eau atteint un certain niveau dans les burettes. On a installé

deux solénoïdes, l'un à l'entrée l'autre à la sortie, connectés chacun sur une burette différente. Les solénoïdes s'ouvrent ou se ferment pour contrôler le passage de l'eau, selon le niveau d'eau dans les burettes. Les solénoïdes sont ouverts au début puis, quand le niveau d'eau atteint un maximum préalablement fixé dans la burette de sortie ou un minimum préalablement fixé dans la burette d'entrée, il y a un signal électrique qui est émis et qui ferme le solénoïde concerné. Il n'y a donc normalement qu'un seul solénoïde qui se ferme et on fait en sorte que ce soit celui à la sortie. Notons également que les solénoïdes sont dans un mode où ils se ferment lorsqu'il n'y a pas de courant, lors d'une panne de courant par exemple.

De plus, suite aux résultats jugés irréalistes avec les essais no. 1 et 2, à savoir la grande concentration de pertes de charge dans le quart amont de la moraine, on a procédé à d'autres changements. On a d'abord allongé le tube d'acier inoxydable de deux piézomètres (voir fig. 3.4), à la fin du premier et du troisième quart du filtramètre, de façon à ce que leur céramique poreuse se retrouve à peu près au centre de l'échantillon et qu'on puisse comparer ces valeurs avec celles prises à environ 100 mm du bord pour les deux autres capteurs situés à la même distance horizontale de la face d'entrée du filtramètre. On n'a toutefois pas noté de différence significative avec les capteurs près de la paroi.

On a également ajouté un diffuseur à l'entrée, formé de gravier 3 - 6 mm, couvrant la face transversale à l'entrée et ayant 50 mm de longueur. Le diffuseur est également beaucoup plus perméable que la moraine, de sorte qu'il se sature complètement avant que l'eau ne commence vraiment à pénétrer dans la moraine. On a aussi fait quatre autres trous à l'entrée, dans les quatre coins, pour un total de cinq (voir fig. 3.3, coin inférieur gauche), pour avoir une poussée d'eau plus uniforme sur le diffuseur puis sur la moraine. Les cinq trous et le diffuseur, visent à simuler fidèlement le réservoir d'eau qui pousse sur le barrage. Notons que l'ajout du diffuseur a été complété par l'ajout de quatre capteurs de chaque côté du filtramètre, et de part et d'autre de l'interface

diffuseur/moraine. On a en plus ajouté deux autres sorties, une dans chaque coin inférieur. À partir de l'essai no. 3, on a ajouté un diffuseur devant les sorties. Il couvre toute la largeur de la face, a environ 75 mm de long et 76 mm de haut (le quart du volume total de la première couche).

De plus, pour les essais no. 4 et 5, on a ajouté un trou dans le haut de la face transversale à la sortie, pour permettre d'évacuer l'air qui pourrait être emprisonné dans cette zone. Cette sortie est à l'air libre et est reliée à un système de tube en U rempli d'eau, où l'air évacué pousse l'eau qui est alors évacuée du système et récupérée. Le volume d'eau ainsi récupéré correspond au volume d'air évacué de l'échantillon. Notons que cette sortie d'air n'est ouverte que lorsque la burette aval est à la pression atmosphérique.

3.2.1.3 Burettes instrumentées

L'entrée et la sortie du filtramètre sont branchées à des burettes (voir figure 3.3, coin supérieur droit) au moyen de tubulures flexibles de cuivre de 9,5 mm de diamètre interne. Chaque burette a une capacité de près de 140 litres et peut soutenir une pression de 1000 kPa. Les parois internes des burettes sont enduites de verre, les protégeant ainsi de la corrosion. Les burettes sont pourvues à leur base d'un capteur de pression différentiel (Viatran^{MD}), qui permet la détermination du volume d'eau contenu. L'étalonnage de ces transducteurs montre que l'incertitude des mesures de volume est de l'ordre de ± 80 ml. La mesure du volume d'eau contenu dans les burettes est utilisée pour calculer les débits entrant et sortant du filtramètre. De même, étant donné qu'on a une quantité définie d'eau dans le système d'alimentation, on peut connaître le volume d'eau absorbé ou rejeté par l'échantillon. On peut apprécier la durée d'imbibition de la moraine sur les courbes données à l'annexe : l'eau apparaît dans la burette aval après 5 à 6 heures.

3.2.1.4 Piézomètres et transducteurs de pression

Vingt-deux piézomètres répartis sur trois rangées sont introduits dans la moraine, le filtre et le diffuseur. La figure 3.4 montre une vue en coupe d'un piézomètre. Il se compose d'un tube d'acier inoxydable de 172 mm de longueur et de 3 mm de diamètre (diamètre interne de 1,5 mm) refermé à l'une de ces extrémités par une céramique poreuse demi-sphérique ayant un diamètre de 6 mm et possédant une pression d'entrée d'air de 100 kPa (SDEC^{MD} France). L'étanchéité entre la céramique poreuse et le tube est assurée par un cordon d'époxy. L'autre extrémité du tube est branchée à un transducteur de pression (Omega^{MD}) par le biais d'une valve. La céramique poreuse, le tube et la cavité du transducteur sont saturés avec de l'eau désaérée. Les pointes des piézomètres sont fixées au moyen d'un coupleur dans les orifices des parois du filtramètre. L'extrémité des pointes des piézomètres est située à environ 100 mm de la paroi interne du filtramètre.

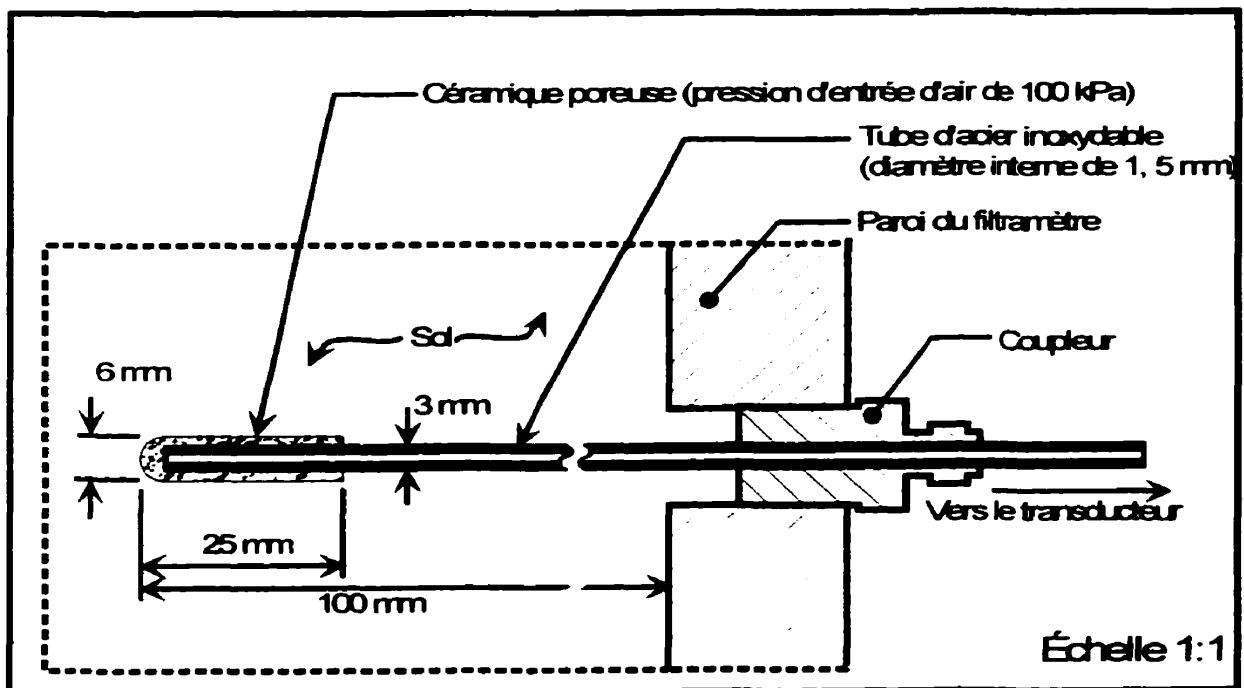


Figure 3.4 : Vue en coupe d'un piézomètre

Des transducteurs de pression sont également employés pour mesurer la contrainte verticale (matelas pneumatique) de même que les pressions d'eau à l'entrée et à la sortie du filtramètre. L'étalonnage des transducteurs a montré que l'incertitude des mesures de pression est de l'ordre de ± 2 kPa.

La pression appliquée dans le matelas pneumatique ou dans les burettes amont et aval est réglée au moyen de contrôleurs de pression. Pour appliquer cette pression, on se sert de manodétendeurs branchés en série sur le réseau de distribution d'air comprimé de l'École, la pression allant jusqu'à 960 kPa.

3.2.1.5 Système d'acquisition de données

Les données provenant des différents instruments de mesure sont acheminées à une unité d'acquisition automatique. Celle-ci se compose d'une carte d'acquisition (Metrabyte^{MD} DAS-16) qui a pour rôle de transformer les signaux analogiques émis par les transducteurs en signaux numériques. Ces derniers sont alors traités par un logiciel d'acquisition de données (Labtech Notebook^{MD}).

Compte tenu des nombreuses composantes de l'unité d'acquisition, on a atténué l'effet des bruits dans la réponse des transducteurs de pression en soumettant les mesures à une moyenne mobile. La moyenne mobile est une méthode qui consiste à établir la valeur moyenne d'une variable sur un nombre prédéterminé de périodes antérieures. Des mesures ont été prises par les transducteurs à toutes les secondes et ont été soumises à une moyenne mobile de 10 périodes, c'est-à-dire que la moyenne des dix dernières lectures est calculée (soit les lectures des dix dernières secondes) et ce, à chaque seconde. Afin d'éviter de surcharger les fichiers de données, qui contiennent 26 colonnes et 30 à partir de l'essai no. 3, des fréquences d'enregistrement variables ont été introduites dans le logiciel d'acquisition de données. La figure 3.5 présente le schéma

global du montage avec les différents circuits hydrauliques et d'acquisition de données. On peut voir le support des vannes de contrôle sur la partie droite de la figure 3.3.

3.2.2 Matériaux utilisés

3.2.2.1 Base

La base utilisée est la même moraine que celle utilisée pour la première partie des essais, sauf que cette fois elle est utilisée à son état naturel, i.e. avec environ 27% de particules fines. Sa courbe granulométrique a déjà été présentée dans Loungnarath et Lafleur (1996) et elle est présentée avec les résultats des analyses granulométriques (section 4.2.6). Pour une moraine avec 30% de particules fines, la teneur en eau optimale est de 6,3% et la masse volumique maximale du matériau sec est de 2114 kg/m^3 . La base est stable selon le critère de Kenney et Lau (1986), la figure est présentée à l'annexe G.

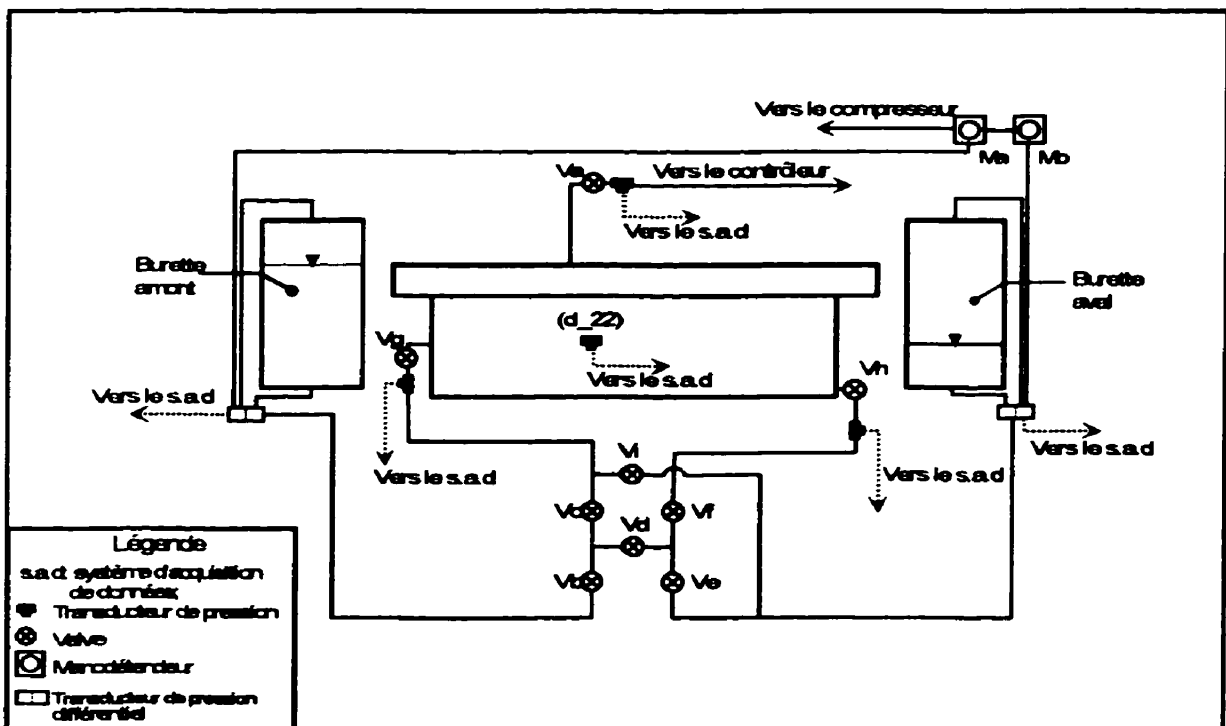


Figure 3.5 : Schéma global du montage

3.2.2.2 Filtre

Pour cette partie, on a également utilisé deux filtres, grossier (FN3) et fin (FN1). Dans les deux cas il s'agit de gravier sableux dont les courbes granulométriques correspondent aux frontières du fuseau spécifié pour la zone 2A des ouvrages de l'aménagement LG4, écrêtée à 38 mm. Les courbes granulométriques sont présentées à la figure 3.6. Les filtres ont été reconstitués à partir de sables et de graviers manufacturés. Les masses volumiques minimum et maximum du filtre fin sont de 1926 kg/m^3 et 2267 kg/m^3 respectivement alors que pour le filtre grossier elles sont de 1864 kg/m^3 et 2084 kg/m^3 respectivement.

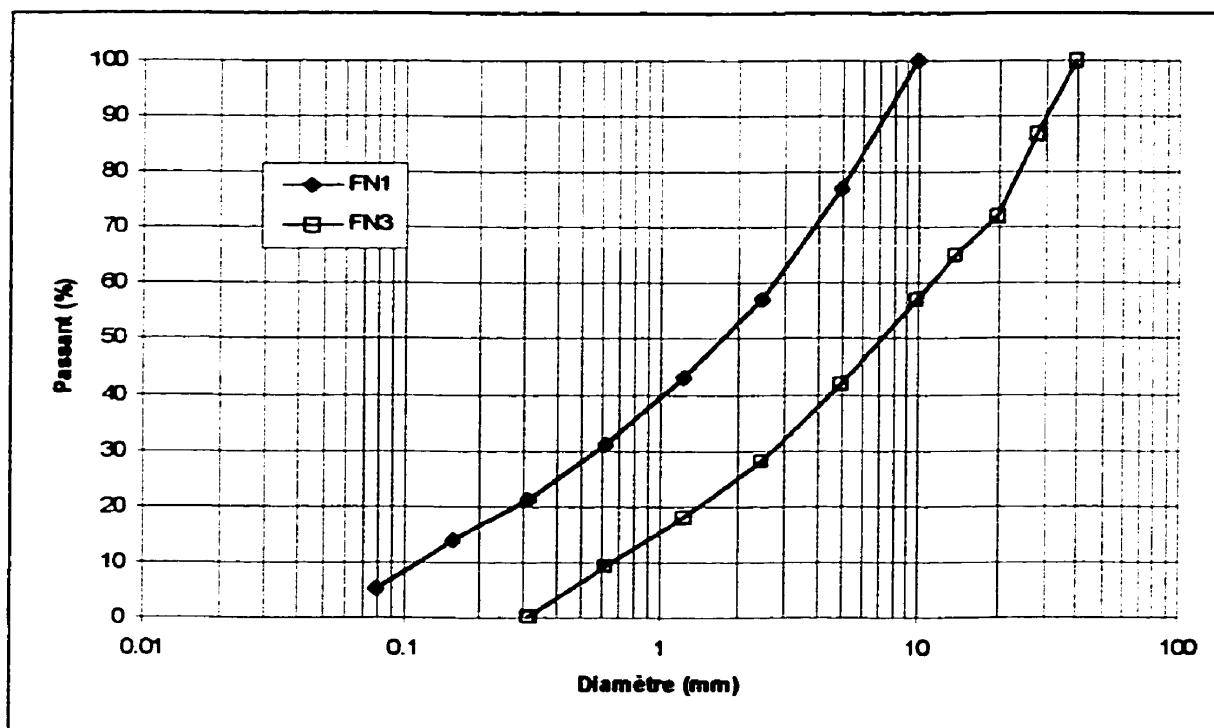


Figure 3.6 : Courbes granulométriques des filtres

3.2.3 Procédures suivies lors d'un essai

3.2.3.1 Généralités

La moraine et le filtre sont compactés en quatre couches de 76 mm de hauteur. L'interface entre les deux matériaux est créée par un mince panneau de tôle glissé le long d'une chicane à la toute fin de la densification de chaque couche. Il en est de même pour l'interface entre le diffuseur et la moraine, à partir de l'essai no.3; lors des essais no. 1 et 2 il y avait une zone de gravier fin devant le trou d'entrée d'eau. L'addition d'une nouvelle couche de matériau est toujours précédée d'une scarification de la couche réceptrice. Pour empêcher l'écoulement préférentiel au-dessus de l'échantillon, quatre cornières en tôle mince sont introduites dans la moraine à la fin du compactage. Leur emplacement coïncide avec les chicanes du filtramètre et un cordon de butyle a été appliqué à leur jonction; à partir de l'essai no. 3, il y avait une cornière à l'interface diffuseur/moraine, une à l'interface moraine/filtre et les deux autres à distances égales dans l'espace entre les deux interfaces. Des cordons de butyle sont disposés (en continu) sur les cornières et sur le périmètre des échantillons de sols, sur lesquels on vient déployer la membrane de néoprène.

La moraine a été compactée à sa teneur en eau optimum selon le Proctor standard pour les essais no.1 et 2 et sa teneur en eau plus un pour-cent lors des essais 3, 4 et 5. La densité visée correspondait à la masse volumique maximale du matériau pour une énergie de compactage Proctor. Le filtre a été mis en place à une teneur en eau de 2%, de façon à éviter une ségrégation des particules lors de la mise en place du filtre et l'indice de densité relative (I_D) visé vaut 70%. Le tableau 3.3 résume ces conditions.

Tableau 3.3 : Conditions de mise en place avec le filtramètre horizontal

Essai no.	Base			Filtre	
	Teneur en eau w (%)	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)	% Proctor standard	Type	Masse volumique sèche ρ_d (kg/m ³)
1	6.3	2105	95	fin	2092
2	6.3	2102	95	fin	2068
3	7.3	2098	95	grossier	2042
4	7.3	2100	95	fin	2078
5	7.3	2091	95	grossier	2024

Lors de la mise en place des matériaux, le contrôle de densité a été effectué d'une façon indirecte. Le volume occupé par chaque couche de matériau, de même que la teneur en eau et la masse volumique du matériau sec visées étant connues, on en déduit la masse de sol requise.

Pour chaque couche de moraine et de filtre, on a procédé à un échantillonnage afin d'en vérifier la teneur en eau et la granulométrie. La masse minimale des spécimens de moraine et de filtre a été fixée à 16 et 4 kg respectivement.

Les échantillons de moraine et de filtre (gravier sableux), ont respectivement des masses de près de 494 kg (123.5 kg par couche) et 112 kg (28 kg par couche) pour les essais no. 1 et 2. Elles sont de 476 kg (119 kg par couche) et 105 kg (21 kg pour la 1^{re} couche et 28 kg pour les 3 autres) pour les essais no. 3, 4 et 5, à cause des diffuseurs. Afin de faciliter la manutention, la manipulation et le contrôle de sa teneur en eau, la moraine a été stockée dans des seaux de 20 litres. La masse de sol contenu dans chaque seau est connue au gramme près.

3.2.3.2 Saturation des céramiques poreuses et détermination de leur perméabilité

Afin de vérifier l'intégrité des céramiques poreuses et des joints d'époxy, les pointes des piézomètres ont toutes été soumises à un essai de perméabilité avant chaque essai. La percolation sous vide d'eau désaérée est suffisante pour en assurer la saturation. Chaque pointe est branchée à une burette graduée remplie d'eau désaérée dans laquelle on applique une pression de 25 kPa. On a relevé en fonction du temps, le volume d'eau traversant la pointe du piézomètre. Connaissant le débit, le gradient hydraulique appliqué et le facteur de forme de la céramique poreuse, on a calculé la perméabilité des céramiques poreuses pour en comparer les résultats aux spécifications du manufacturier pour ne garder que les céramiques rencontrant les spécifications.

3.2.3.3 Préparation de la moraine

Des mesures de teneur en eau montrent que la moraine du dépôt n°6 du projet LG-4 présente une teneur en eau moyenne de 5%. Il a alors été nécessaire de déterminer la teneur en eau moyenne de la moraine contenue dans chaque seau sélectionné pour l'essai et d'y ajouter la quantité d'eau requise pour atteindre la teneur en eau visée. Les différents seaux ont par la suite été jumelés et assignés à une couche de sorte que leur masse totale excède la quantité de moraine nécessaire pour une couche, additionnée de la masse minimale du spécimen pour fin de caractérisation. La masse de sol de chaque couche est alors contrôlée en prélevant de la masse totale de sol contenu dans les seaux, un spécimen dont la masse correspond à la différence entre la masse totale de sol et la masse d'une couche.

3.2.3.4 Préparation du filtre

Le filtre a été préparé dans un grand bac où ont été mélangés en des proportions prédéterminées les différents grades de sable et de gravier manufacturés auxquels on a ajouté la quantité d'eau requise pour atteindre la teneur en eau désirée (2%). On prenait alors les quantités requises de sol pour chaque couche et pour les échantillonnages, directement du bac, puis on mélangeait le reste pour les prochains prélèvements.

3.2.3.5 Mise en place de la moraine

Avant sa mise en place dans le filtramètre, la moraine provenant des différents seaux a été préalablement homogénéisée. On a trituré le contenu des seaux sur le plancher au moyen d'une pelle. Une fois la moraine bien homogénéisée, un spécimen est prélevé pour une mesure de teneur en eau et une analyse granulométrique. Le reste de la moraine est placé à l'état lâche dans le filtramètre. Elle a ensuite été compactée par vibration au moyen d'un marteau électrique (Kango 950, 2200 percussions à la minute, masse de 20 kg). Le compactage se fait au moyen du marteau muni d'une dame de 304 x 304 mm, sous le poids d'une personne et jusqu'à la hauteur désirée.

3.2.3.6 Mise en place du filtre

Les masses de filtres sont prises directement du grand bac, pour chaque couche et pour l'échantillonnage. Le filtre est placé dans le filtramètre et est compacté au moyen d'une dame de 152 x 152 mm jusqu'à obtention de la densité désirée.

3.2.3.7 Mise en place des pointes des piézomètres

Les pointes des piézomètres ont été introduites au fur et à mesure des levées. Afin d'éviter leur rupture au moment de la densification d'une nouvelle couche de sol, les

céramiques poreuses ont été enfouies dans la couche réceptrice de sorte que leur paroi et la surface de la couche de sol précédente coïncident. Pour éviter qu'elles ne se dessaturent, la portion externe des pointes des piézomètres sont toutes fermées par une valve.

3.2.3.8 Fermeture

Après le compactage, on met en place le double joint de butyle, la membrane et le matelas pour fermer le filtramètre. On exerce un serrage contrôlé à 136 N*m des boulons et des poutres également. Il ne reste plus qu'à remplir d'eau le ballon.

3.2.3.9 Déroulement d'un essai

Tous les essais débutent à la teneur en eau de compactage ($S_r < 100\%$). Les essais 1, 2 et 3 ont été faits en discontinu, l'écoulement était arrêté la nuit lorsque le débit était plus grand que la quantité d'eau disponible, alors que les essais 4 et 5 ont été faits en continu. Lorsque le débit était trop grand, on diminuait le gradient pour la nuit. On était cependant obligé d'arrêter l'écoulement de 10 à 15 minutes lorsque venait le temps de permuter les burettes. On commence par appliquer une pression de 120 kPa à l'entrée, sauf pour l'essai no. 1 où la pression initiale à l'entrée a été de 70 kPa, alors que la sortie est à l'air libre. Avant de passer à une autre étape, on attendait que les lectures piézométriques et/ou que le débit soit(ent) stable(s). Les étapes subséquentes sont différentes pour tous les essais. La pression à l'entrée P_m est augmentée par étapes jusqu'à un maximum de 760 kPa. La pression à la sortie P_{out} est augmentée par étapes jusqu'à un maximum de 640 kPa, soit en même temps que celle à l'entrée (essais 1, 2 et 3), ou seulement après que l'entrée ait atteint son maximum (essais 4 et 5). Pour les essais 1, 2 et 3, on augmente P_m et P_{out} de la même quantité de façon à garder un gradient constant (5 pour l'essai 1 et 10 pour les essais 2 et 3). Pour les essais 4 et 5 le gradient augmente à chaque étape suivant l'augmentation de P_m . On a également la

pression de confinement P_{conf} , exercée par l'intermédiaire du matelas, qui est toujours supérieure de 200 kPa à la plus grande des pressions entre l'entrée et la sortie et qui va jusqu'à une valeur de 960 kPa. Une fois atteinte l'étape où $P_{conf} = 960$ kPa, $P_m = 760$ kPa et $P_{out} = 640$ kPa, on considère avoir atteint l'état saturé bien qu'on n'ait pas 100% de saturation, tel que constaté en faisant le bilan de l'eau absorbée par l'échantillon. Le tableau 3.5 donne la succession des étapes pour tous les essais. Lors des essais 1, 2 et 3 on a gardé le gradient constant; pour la suite de l'essai no.3 on a joué sur les pressions, augmentées et diminuées, en observant la réaction du système puisqu'on suspectait que l'air puisse avoir un certain rôle sur la distribution des pertes de charge et sur la perméabilité. Lors des essais 4 et 5, on a plutôt gardé la sortie à l'air libre pour les premières étapes et on a également varié P_{out} pour les dernières étapes.

3.2.3.10 Traitement des données

Les fichiers de données, fournis par le système d'acquisition de données, sont traités avec le tableur Excel. Les valeurs des pressions sont d'abord corrigées selon les valeurs initiales des capteurs alors qu'ils étaient ouverts à l'air libre. Le tableau 3.4 présente la façon de calculer les paramètres et les variables entrant en ligne de compte.

3.2.3.11 Démontage

Une fois l'essai terminé, on récupère des échantillons d'environ 15 kilogrammes. Le sol est divisé en cinq tranches verticales, une pour le filtre et quatre pour la moraine à peu près égales d'environ 300 mm de longueur sur toute la hauteur du sol. Chaque tranche est alors divisée en six zones sur deux rangées et trois colonnes. On récupère aléatoirement deux de ces six zones pour les analyses granulométriques (on récupère donc le tiers de la quantité totale de sol). La procédure suivie pour les analyses granulométriques est présentée sur la figure 3.7.

Tableau 3.4 : Étapes pour le traitement des données

Calcul du gradient	<p>essais 1 et 2</p> $i = (P_{in} - MP_I)/(L_1 * g)$ <p>essais 3, 4 et 5</p> $i = (MP_D - MP_I)/(L_2 * g)$	<p>MP_I : moyenne de la pression mesurée en kPa par les 3 capteurs juste avant l'interface base/filtre</p> <p>L_1 : longueur de la base = 1.207 m</p> <p>g : accélération gravitationnelle = 9.81 m/s²</p> <p>MP_D : Moyenne des pressions juste avant et après l'interface diffuseur amont/base</p> <p>L_2 : longueur entre l'interface diffuseur amont/base et celui base/filtre = 1.157 m</p>
Calcul du débit	$Q_{in,out} = (V_{in,out}/1000 * 1000)/T$	<p>Q : débit en m³/s</p> <p>V : volume d'eau cumulé entre 2 lectures, en ml, de la burette d'entrée (in) ou de sortie (out)</p> <p>T : temps cumulé entre 2 lectures, en secondes</p>
Calcul de la Perméabilité globale	$k = ((Q_{in} + Q_{out})/2)/(i * A)$	<p>Q : débit en m³/s</p> <p>A : aire transversale = 0.182 m²</p>
Calcul du pourcentage de perte de charge	$\%P_i = ((P_{in} - P_i) * 100) / (P_{in} - P_{out})$	

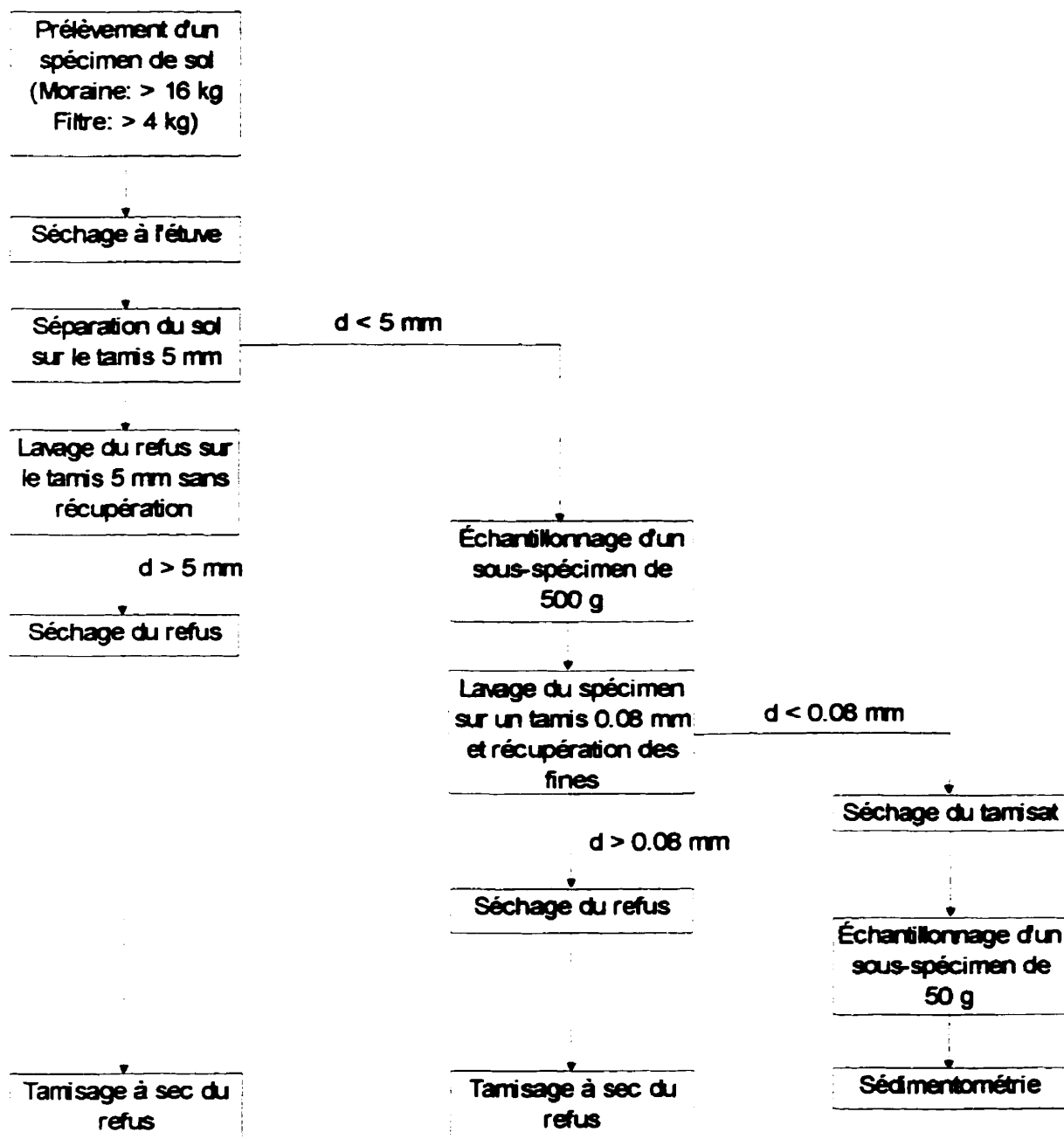


Figure 3.7 : Procédures suivies lors des analyses granulométriques

3.2.4 Programme

Le tableau 3.5 donne les étapes de filtration alors que la figure 3.8 les résume sous forme de graphiques.

L'essai no.1 avait pour objectif d'éprouver le montage. On a débuté l'essai avec un sol déjà en place depuis quelques mois. On a considéré ce test comme valide puisqu'on n'a pas eu de problème avec le montage lors de l'essai et on l'a répété avec l'essai no.2, sous les mêmes conditions mais avec un sol mis en place à teneur en eau optimum, pour comparer les résultats. L'essai no.3 est le premier avec le diffuseur amont, les cinq trous à l'entrée et les trois sorties d'eau. L'essai no. 4 est le premier utilisant la sortie d'air et un système pour la récupérer. Le système n'était pas tout à fait efficace car il est possible que de l'air sorte également par les sorties d'eau. On ne peut donc tirer de conclusions à partir des volumes d'air mesurés. L'essai no. 5 a été réalisé sous les mêmes conditions que l'essai no. 4 mais en utilisant le filtre grossier. Cet essai est le dernier réalisé dans le cadre de ce projet de recherche.

Tableau 3.5 : Étapes de filtration

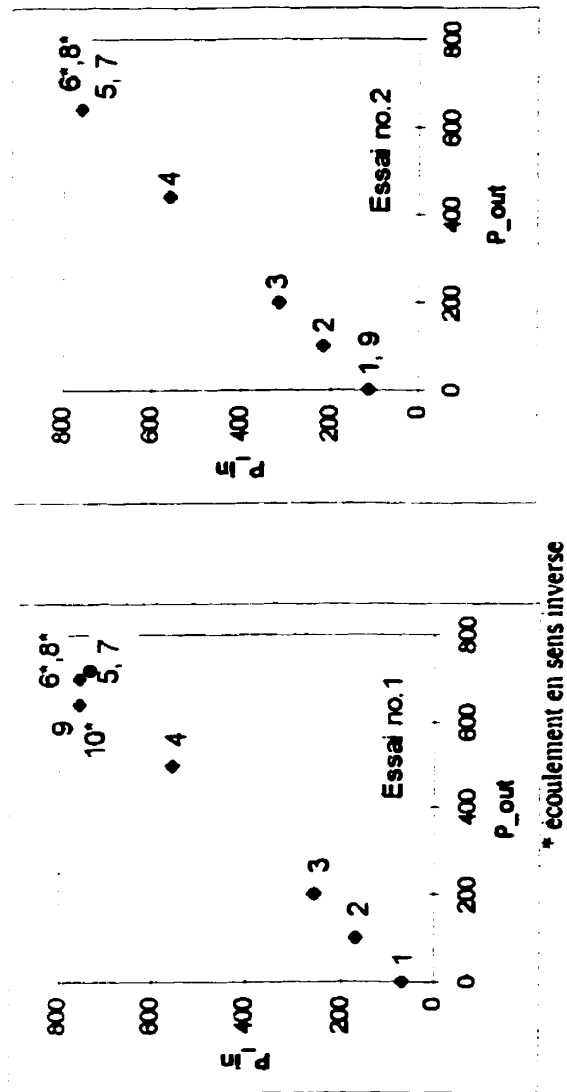
Ess. no.	Étape	Pression dans le matelas (kPa)	Pression d'eau à l'entrée (kPa)	Pression d'eau à la sortie (kPa)	Gradient (-)	Durée (h)
1	1	270	70	0	6	80
	2	370	170	100	6	115
	3	460	260	200	5	100
	4	760	560	500	5	93
	5	960	760	700	5	80
	6*	960	760	700	5	4
	7	960	760	700	5	29
	8*	960	760	700	5	2
	9	960	760	640	10	7
	10*	960	760	640	10	8

Tableau 3.5 : Étapes de filtration (suite)

2	1	320	120	0	10	183
	2	420	220	100		147
	3	520	320	200		49
	4	760	560	440		55
	5	960	760	640		44
	6*	960	760	640		6
	7	960	760	640		14
	8*	960	760	640		2
	9	320	120	0		22
*: écoulement inversé						
3	1	320	120	0	10	62
	2	420	220	100	10	90
	3	520	320	200	10	71
	4	760	560	440	10	93
	5	960	760	640	10	43
	6	960	760	400	30	2
	7	960	760	160	50	2
	8	960	760	0	63	2
	9	960	760	640	10	16
	10	960	760	0	63	8
	11	960	760	640	10	16
	12	960	560	440	10	1
	13	520	320	200	10	1
	14	320	120	0	10	1
	15	600	400	0	33	1
	16	960	760	0	63	3
	17	320	120	0	10	2
	18	960	760	0	63	4
	19	960	760	640	10	16
4	1	320	120	0	10	91
	2	420	220	0	18	71
	3	520	320	0	27	50
	4	760	560	0	47	45
	5	960	760	0	63	99
	6	960	760	200	38	4
	7	960	760	440	27	4
	8	960	760	640	10	16
	9	960	760	0	63	2
	10	960	560	0	47	3
	11	960	320	0	27	3
	12	960	120	0	10	16

Tableau 3.5 : Étapes de filtration (suite)

5	1	320	120	0	10	71
	2	360	160	0	13	3
	3	400	200	0	17	3
	4	440	240	0	20	3
	5	480	280	0	23	3
	6	520	320	0	27	3
	7	560	360	0	30	3
	8	600	400	0	33	3
	9	640	440	0	37	3
	10	680	480	0	40	3
	11	720	520	0	43	3
	12	760	560	0	47	3
	13	800	600	0	50	3
	14	840	640	0	53	3
	15	880	680	0	57	3
	16	920	720	0	60	3
	17	960	760	0	63	3
	18a	960	760	0	63	2
	18b	960	760	100	55	2
	18c	960	760	200	47	2
	18d	960	760	400	30	2
	19	960	760	640	10	19
	20	960	560	440	10	1
	21	960	320	200	10	1
	22	960	120	0	10	2
	23	960	760	0	63	1
	24	960	60	0	5	936
	25	960	760	0	63	5
	26	960	760	640	10	16
	27	960	60	0	5	25



* écoulement en sets inverse

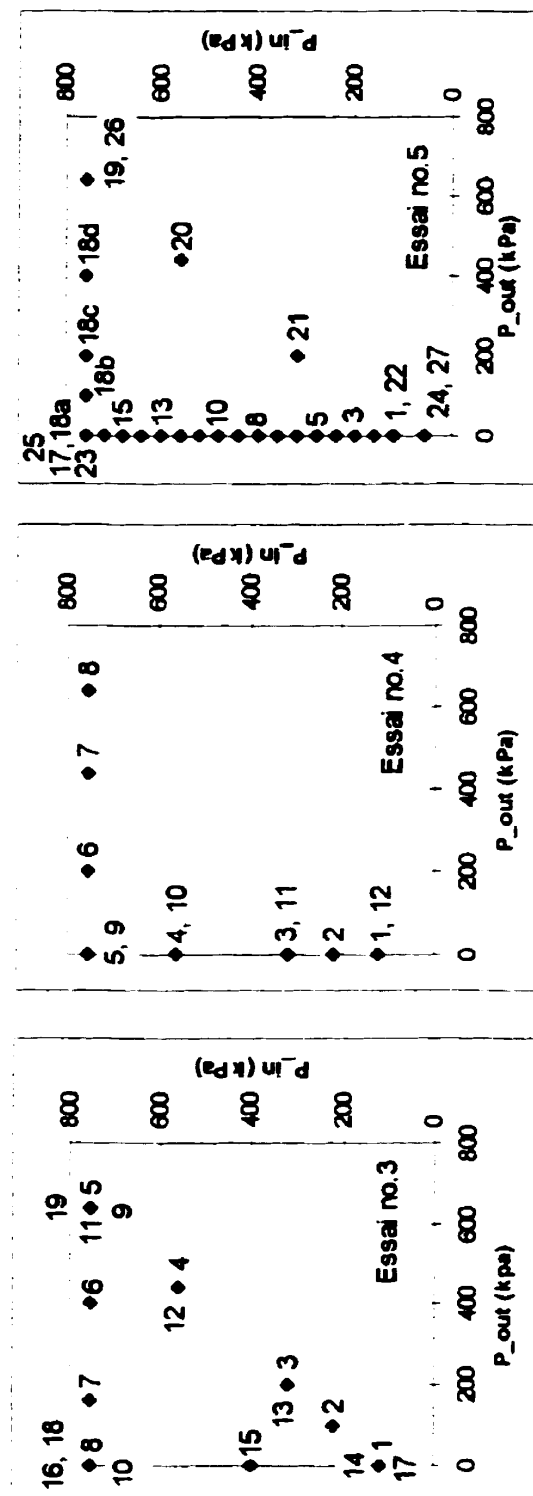


Figure 3.8 : Cheminement des pressions

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 Petit filtramètre

4.1.1 Essais sans piston

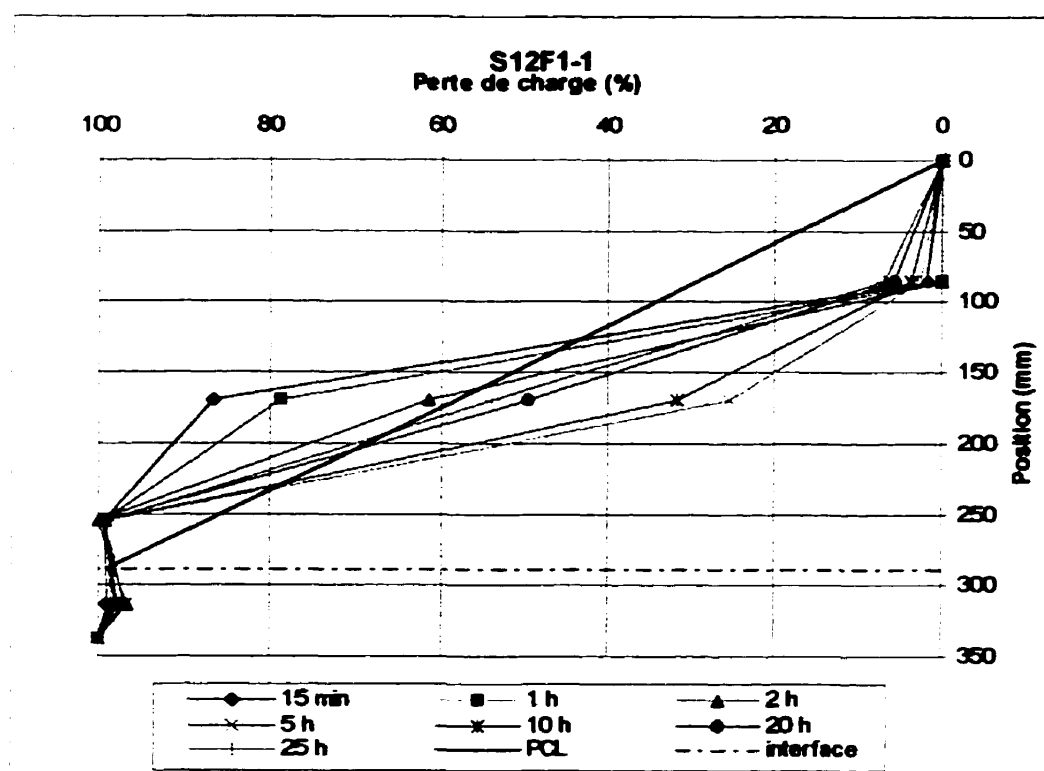


Figure 4.1 : Distribution des pertes de charge pour l'essai S12F1-1

Il y a eu quatre essais avec les deux filtres effectués avec le perméamètre sans piston. Étant donné que les essais du même type ont donné à peu près les mêmes résultats, on ne présente ici que les résultats d'un essai de chaque type, l'autre essai du même type se retrouve à l'annexe A. Les distributions des pertes de charge sont présentées aux figures

4.1 et 4.2, alors que la distribution de la perméabilité globale est présentée aux figures 4.3 et 4.4.

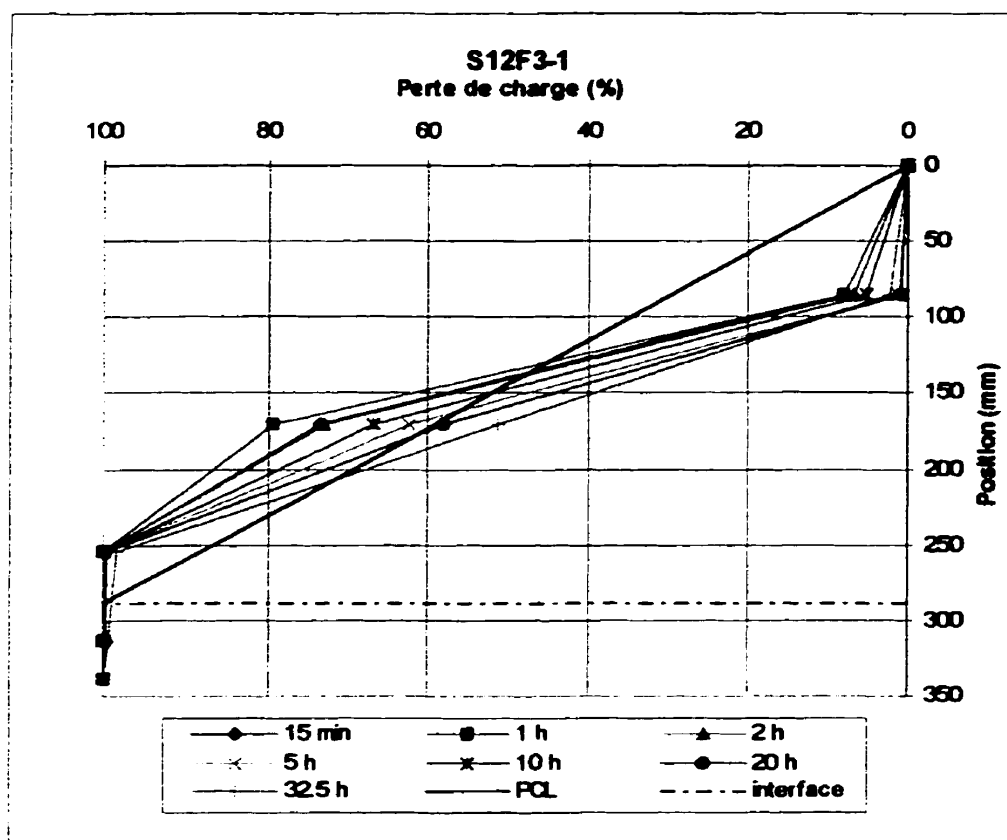


Figure 4.2 : Distribution des pertes de charge pour l'essai S12F3-1

D'une façon générale, tous les graphiques des pertes de charge ont la même allure, que les essais soient réalisés ou non avec le même filtre. Il n'y a pratiquement pas de perte jusqu'au deuxième capteur à 84.9 mm, puis c'est à peu près linéaire jusqu'au quatrième capteur, à partir duquel il n'y plus de perte de charge : il n'y a donc pas de perte de charge dans le filtre. On peut aussi noter qu'à l'occasion, il y a un grand écart entre deux lectures pour un même capteur. Ceci survient généralement suite à un arrêt prolongé de l'écoulement.

Sur les graphiques de pertes de charge, il est anormal de n'observer aucune perte de charge dans la première portion de l'échantillon, les 85 premiers millimètres, ce qui a été le cas pour les quatre essais. On peut donc penser qu'il y avait peut être un écoulement préférentiel le long de la paroi de la cellule dans le haut de l'échantillon, facilité par le fait qu'il n'y a plus de contact entre le haut du perméamètre et le sol au cours de l'essai puisqu'on a toujours observé une différence de 5 à 10 mm entre le sol et le haut du perméamètre lors du démontage. Ceci nous a poussés à ajouter un piston, dont les résultats ainsi obtenus seront traités dans la prochaine section.

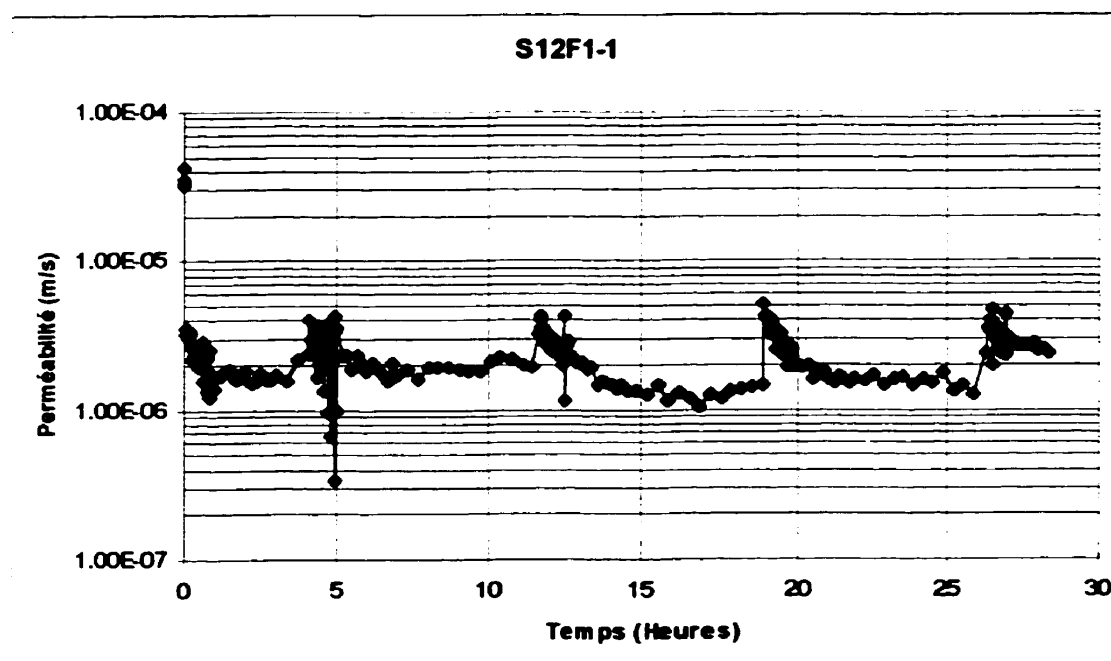


Figure 4.3 : Variation de la perméabilité globale lors de l'essai S12F1-1

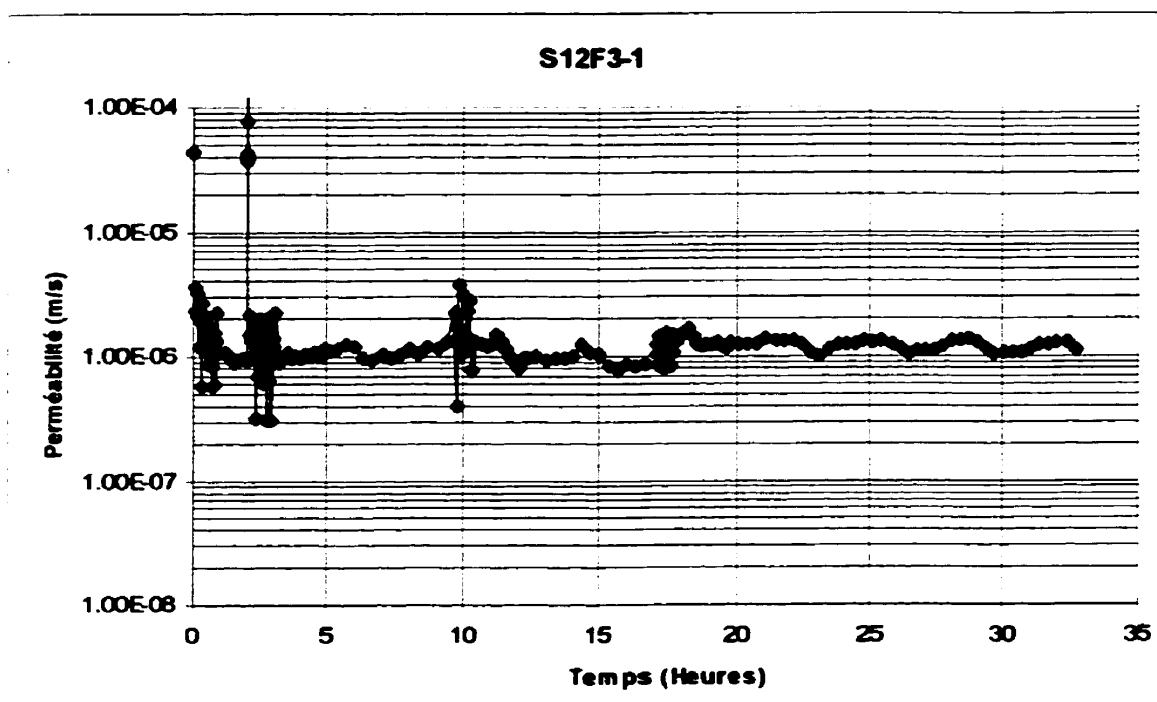


Figure 4.4 : Variation de la perméabilité globale lors de l'essai S12F3-1

En ce qui concerne la perméabilité globale, les graphiques montrent qu'elle est à peu près la même pour les quatre essais, soit environ 1×10^{-6} m/s. Les discontinuités observées sur les graphiques sont rencontrées suite à la reprise de l'écoulement après qu'il ait été arrêté plusieurs heures durant la nuit ou une fin de semaine, ou qu'il ait été arrêté pour permettre la permutation des burettes.

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés aux figures 4.5 à 4.7. Notons que les tranches T5 et T6 sont les deux tranches du filtre, la tranche T4 est la tranche de base juste au-dessus de l'interface. La tranche T1, pour l'essai S12F1-2, est une tranche d'environ 60 mm prise de part et d'autre du 2^e capteur. La granulométrie de cette tranche est à peu près la même que celle des autres tranches de la base.

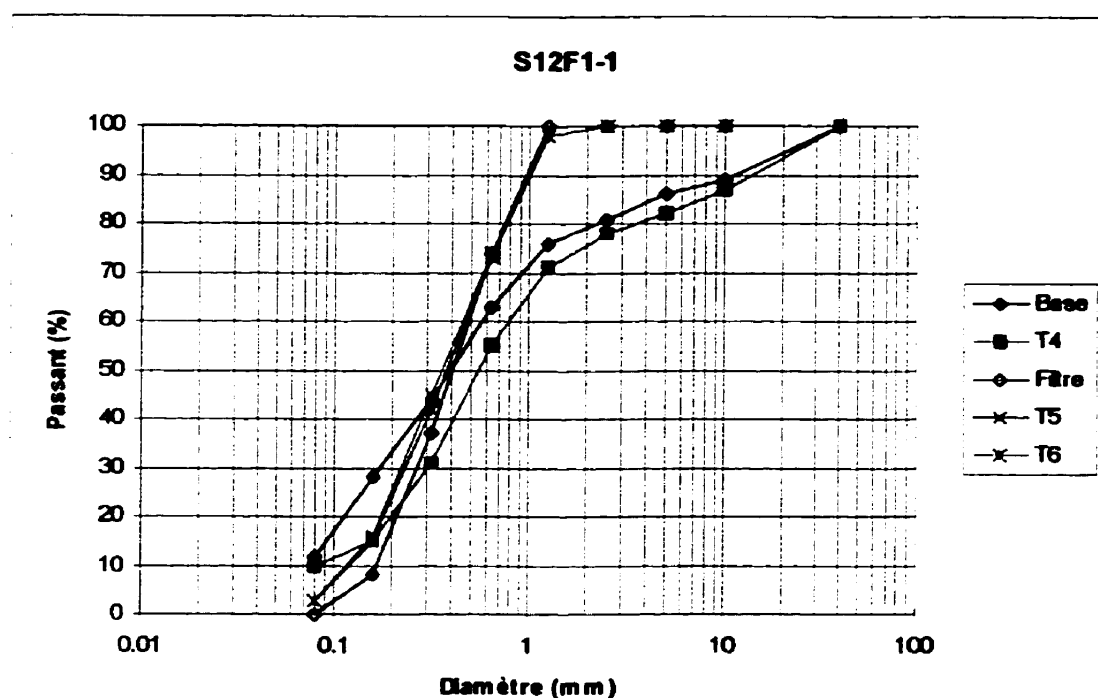


Figure 4.5 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F1-1

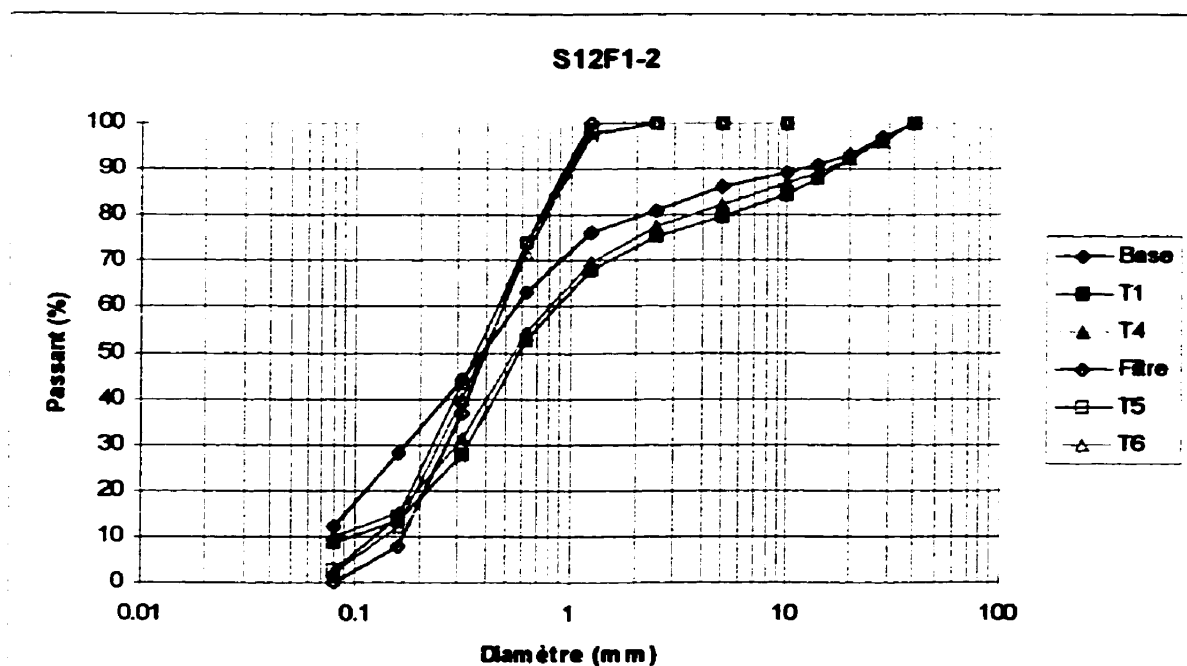


Figure 4.6 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F1-2

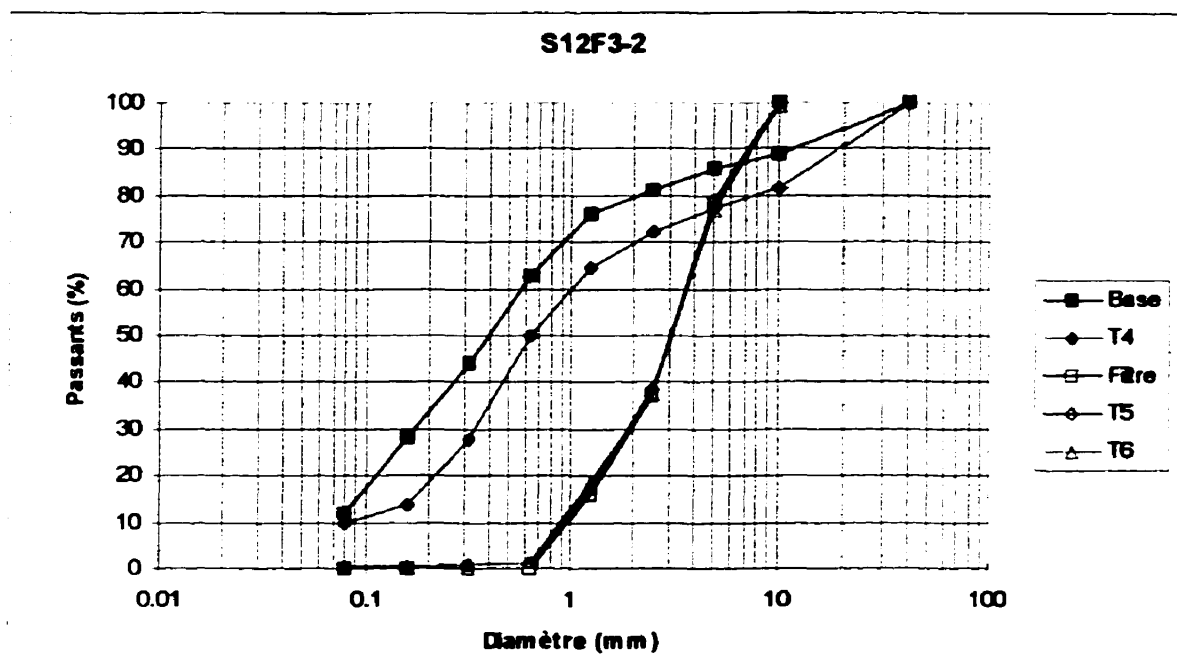


Figure 4.7 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai S12F3-2

Sur les courbes, il n'y a pas de variation significative avant et après essai pour la granulométrie du filtre, et ce pour les trois essais. En ce qui concerne la base, il y a toujours un écart entre les courbes, qui est le plus grand pour l'essai S12F3-2. Ceci peut s'expliquer par un manque d'homogénéité entre les différentes tranches, et ce dès la mise en place de celles-ci.

4.1.2 Essais avec piston

Cette fois encore on ne présente qu'un essai par filtre pour les pertes de charge et la perméabilité globale, puisque la répétition a donné le même résultat. On peut toutefois consulter ces résultats en annexe. Les distributions des pertes de charge sont présentées aux figures 4.8 et 4.9 alors que la distribution de la perméabilité globale est présentée aux figures 4.10 et 4.11.

Les graphiques des pertes de charge ont tous la même allure : pertes de charge linéaires, conformément à la théorie pour un écoulement dans un sol homogène. On peut voir l'influence du piston avec la présence de pertes de charge dans la première partie de l'échantillon, soit les 85 premiers millimètres. On peut également noter qu'il n'y a pas de pertes de charge dans le filtre, comme pour les essais sans piston.

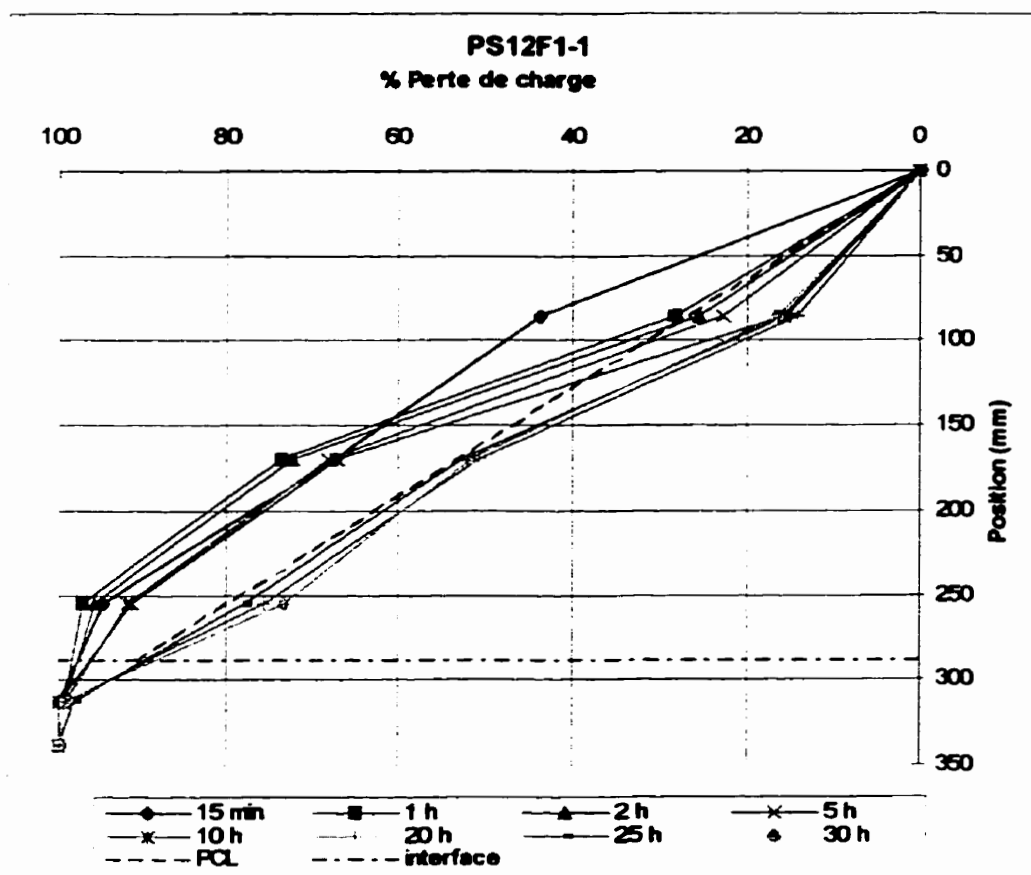


Figure 4.8 : Distribution des pertes de charge pour l'essai PS12F1-1

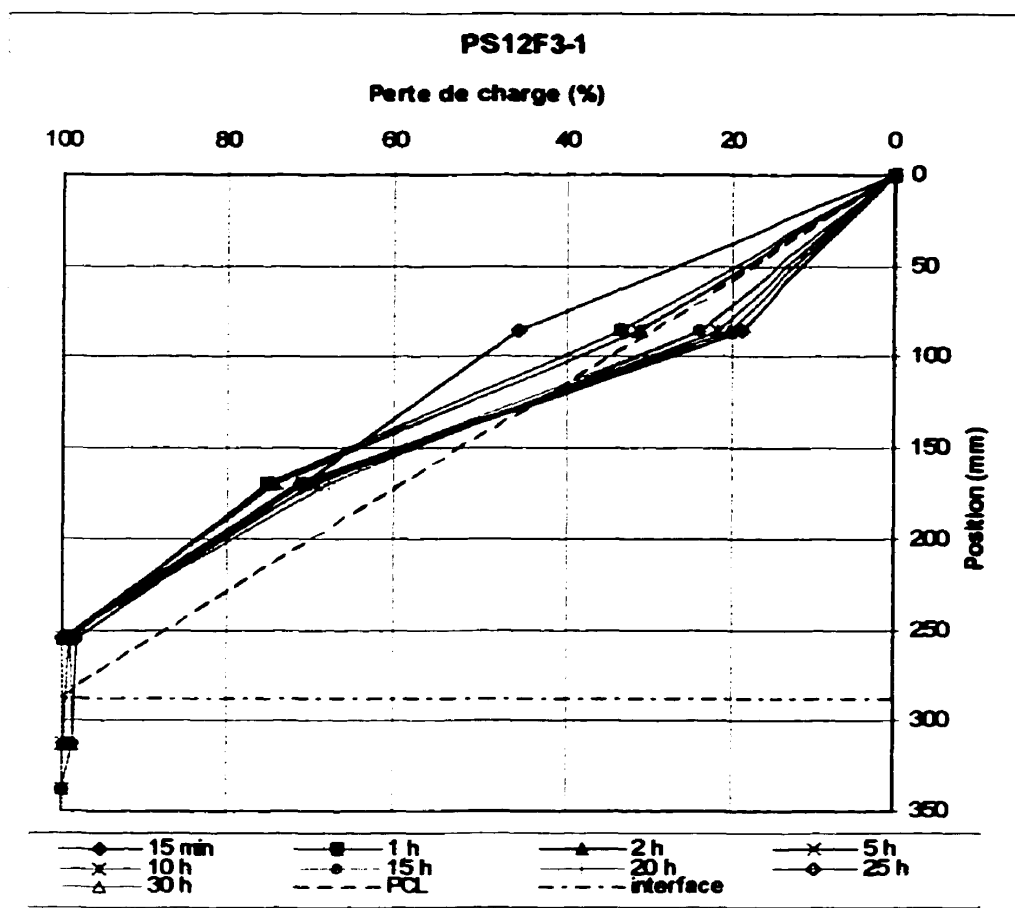


Figure 4.9 : Distribution des pertes de charge pour l'essai PS12F3-1

Les graphiques de perméabilité globale montrent encore, comme pour les essais sans piston, que la perméabilité globale est à peu près la même pour les quatre essais i.e. environ 1×10^{-6} m/s. On retrouve là aussi des discontinuités, pour les mêmes raisons que mentionnées pour les essais sans piston.

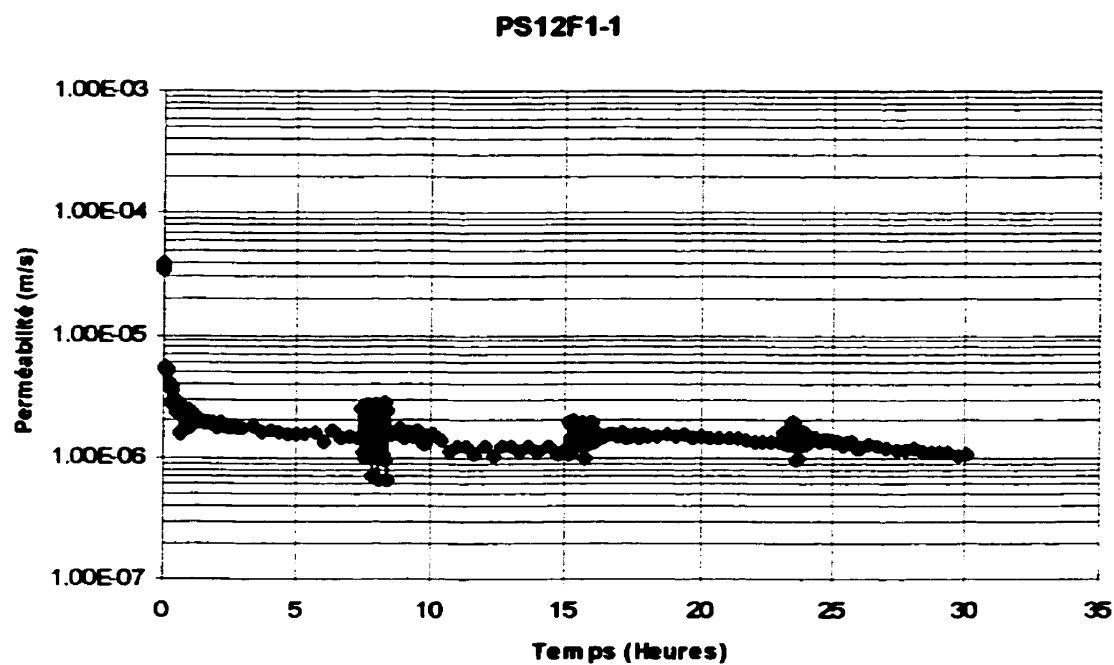


Figure 4.10 : Variation de la perméabilité globale pour l'essai PS12F1-1

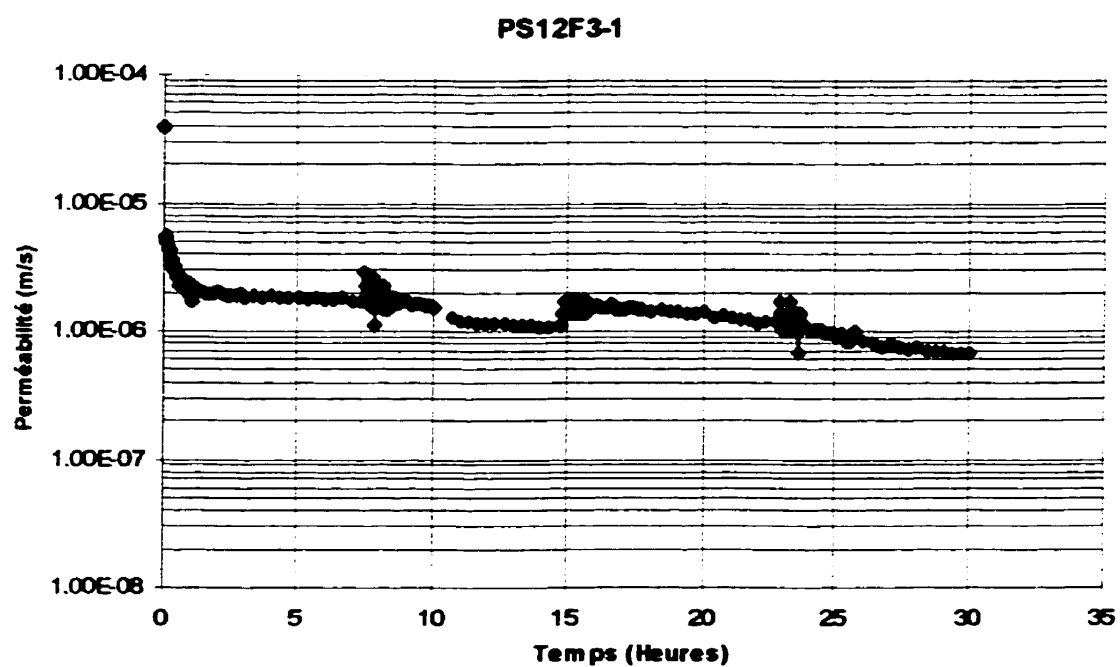


Figure 4.11 : Variation de la perméabilité globale pour l'essai PS12F3-1

On peut retrouver, sur les figures 4.12 à 4.15, les résultats des analyses granulométriques effectuées. Sur ces courbes, on peut constater qu'il n'y a pas vraiment de variation avant et après essai. De façon générale, les écarts ne donnent pas de tendance en fonction du rapport de rétention. Ils peuvent s'expliquer par un manque d'homogénéité entre les différentes tranches, créée lors de leur mise en place. Pour les essais avec piston, la granulométrie de la base est inchangée en cours d'essai alors que pour les essais sans piston, la granulométrie de la base est plus grossière avant essai qu'après essai, surtout sur le tamis 160 μm .

Les figures 4.16 et 4.17 présentent des graphiques montrant la variation de la granulométrie des filtres fin et grossier au cours des essais. Sur ces figures, le terme pénétration désigne la zone contenant toutes les particules dont la taille est plus petite que la plus petite particule présente initialement dans le filtre. Pour le filtre fin (fig. 4.16), en général les variations sont de moins de 5%, à part pour les particules de 0.315 et 0.16 mm de diamètre. Pour le filtre grossier (fig. 4.17), les variations sont faibles, surtout lors de l'essai S12F3-2. Pour les essais PS12F3-1 et PS12F3-2, il y a un peu plus de variation pour les particules de 1.25 à 5 mm de diamètre, pouvant être associées à la séparation des tranches 5 et 6. On peut également remarquer qu'on a plus de pénétration avec le filtre fin qu'avec le filtre grossier qui a un R_R plus élevé. Ceci peut venir du fait que les filtres fins sont non pré-lavés, i.e. que les particules utilisées pour constituer les filtres fins n'ont pas été lavées, de sorte qu'il pourrait y avoir des particules fines collées sur des particules plus grossières. Ce qui fait en sorte qu'on a plus de particules fines que désiré initialement dans le filtre et qu'ainsi la pénétration obtenue sur la figure 4.16 est plus grande que la pénétration réelle.

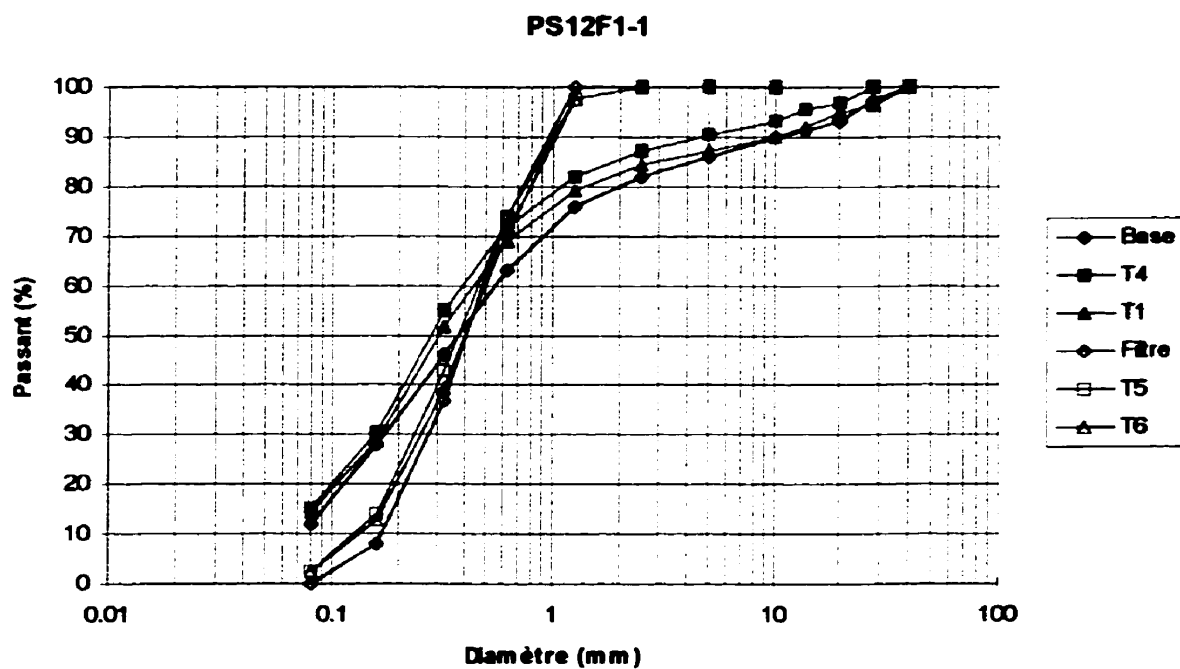


Figure 4.12 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F1-1

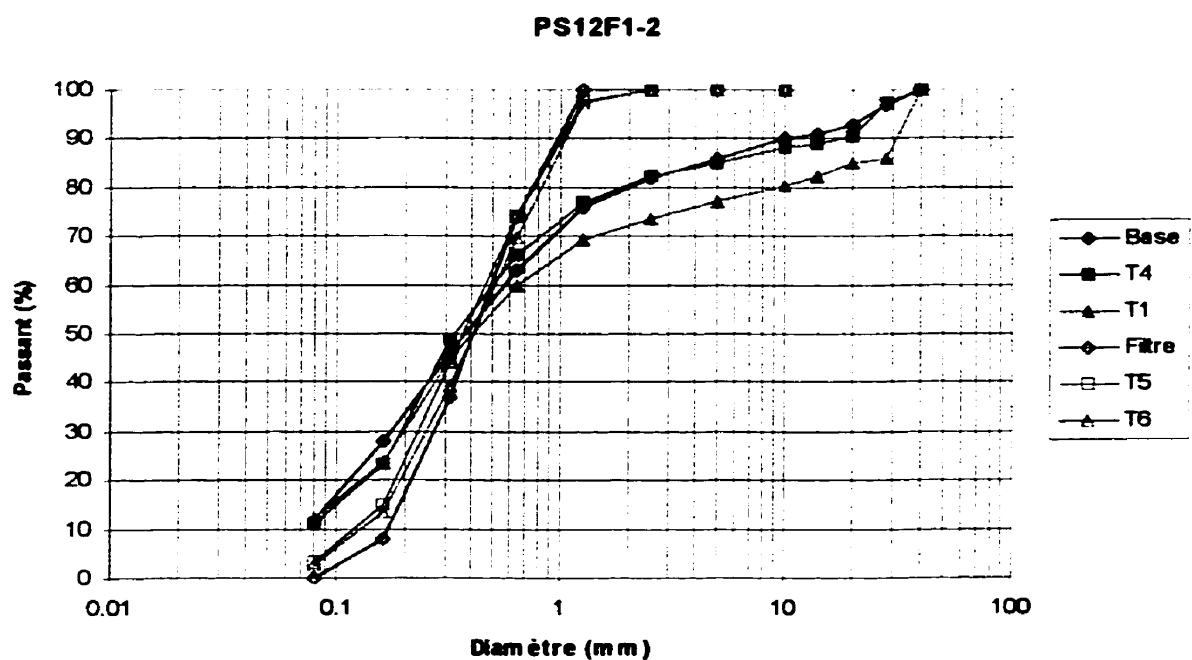


Figure 4.13 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F1-2

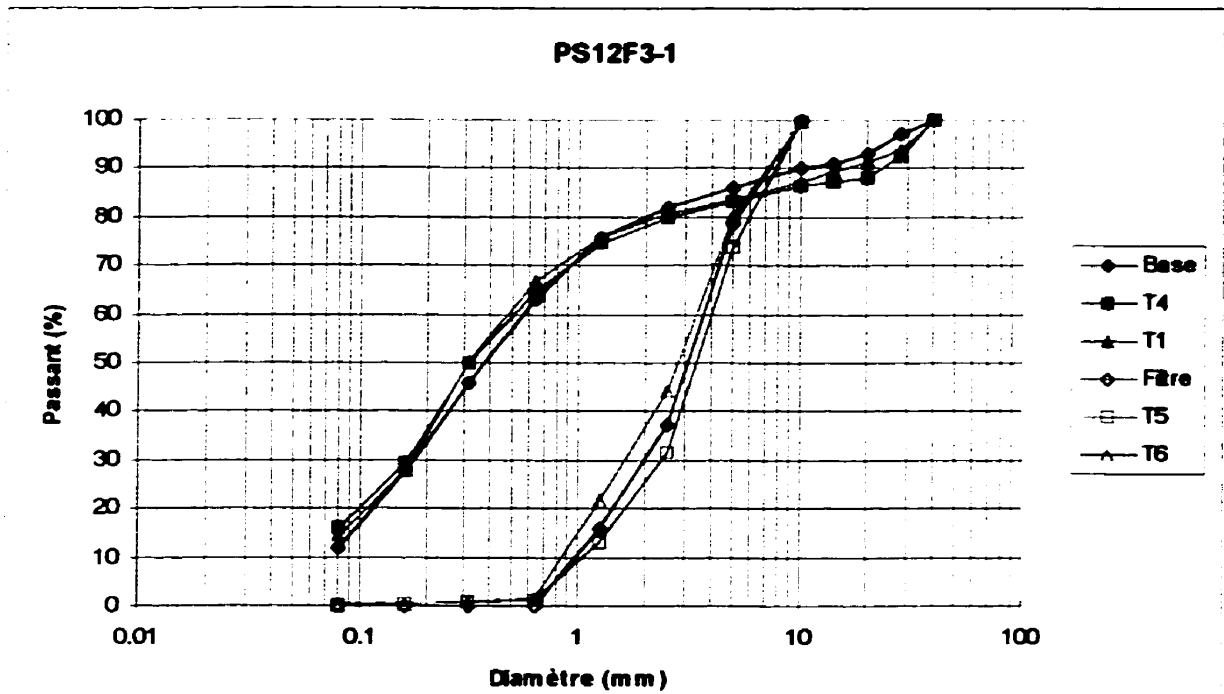


Figure 4.14 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F3-1

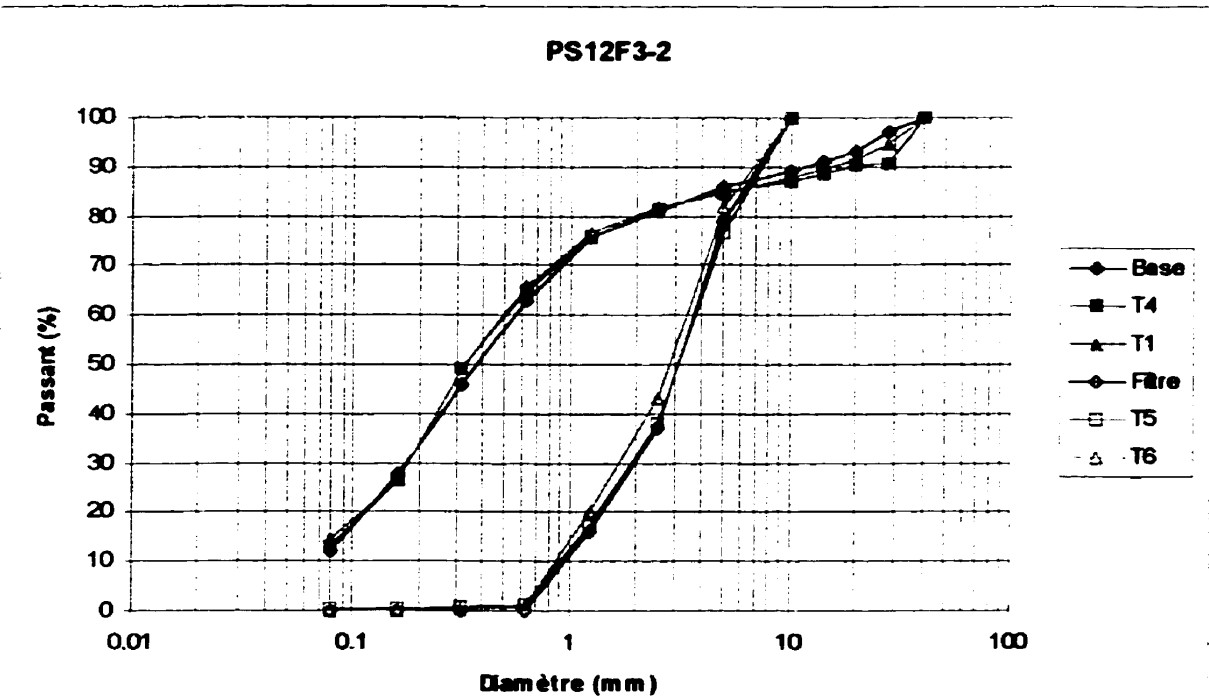


Figure 4.15 : Résultats des analyses granulométriques pour l'essai PS12F3-2

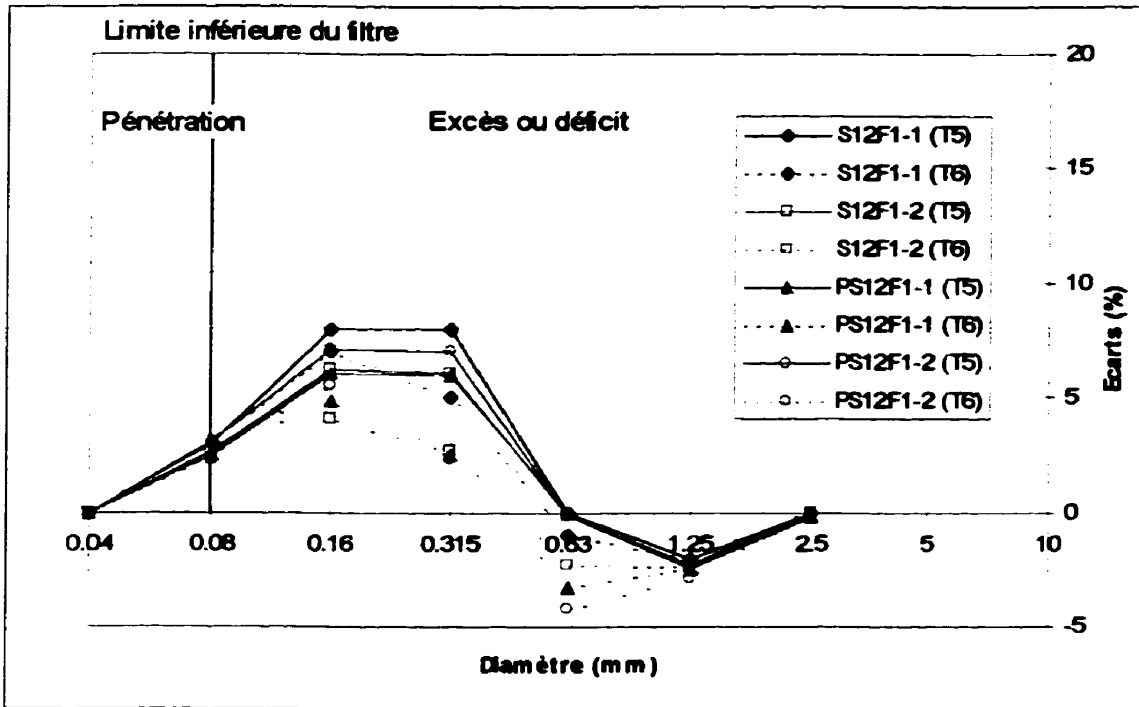


Figure 4.16 : Excès ou déficit de particules dans le filtre fin à la fin de l'essai

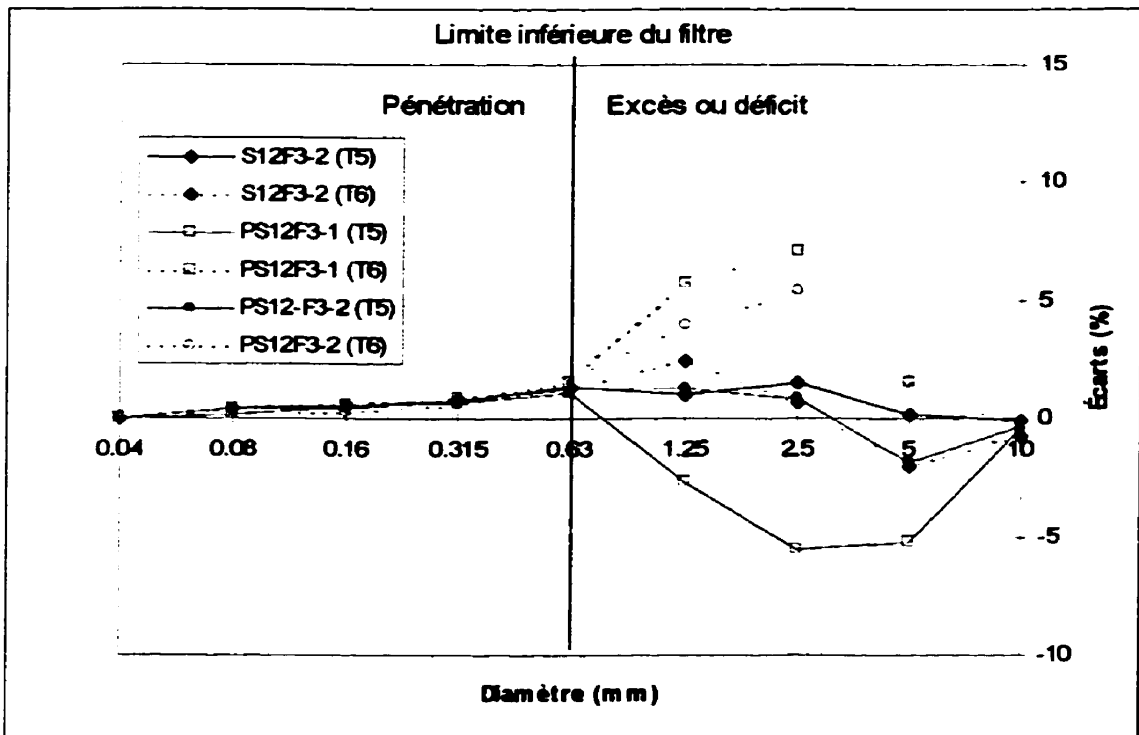


Figure 4.17 : Excès ou déficit de particules dans le filtre grossier à la fin de l'essai

À la lumière des résultats obtenus pour la cellule avec piston, on peut mettre en doute la validité de ceux de la cellule sans piston, où les pertes de charge ne seraient pas représentatives de la réalité. Pour la perméabilité globale, il n'y a pas de différence. On peut donc se baser uniquement sur les résultats obtenus avec la cellule à piston pour conclure sur les essais avec le petit filtramètre.

Les résultats obtenus donnent une courbe de pertes de charge linéaire conforme à la théorie. La perméabilité globale est d'environ 1×10^{-6} m/s. Quant à la granulométrie, il n'y a pas de changement notable au cours de l'essai. On peut donc dire que la base reconstituée à 12% de fines est stable ou non suffosive.

4.2 Filtramètre horizontal

Bien que cinq essais aient été réalisés avec le grand filtramètre, les deux premiers essais n'ont pas donné de résultats concluants.

4.2.0 Reproductibilité des mesures piézométriques

Trois mesures piézométriques sont prises à la même distance horizontale pour les piézomètres situés dans la base et aux alentours de l'interface base/filtre et deux pour les piézomètres situés de part et d'autre de l'interface diffuseur amont/filtre. L'écart entre les mesures, à la même position, était presque toujours faible. Il est arrivé qu'un piézomètre donne une valeur différente des autres. Si les deux autres piézomètres à la même position donnaient toujours la même valeur, on ne tenait plus compte de la valeur du troisième piézomètre pour les calculs.

4.2.1 Résultats des essais no. 1 et 2

Les deux essais ont donné les mêmes résultats. Ils ont été faits en plusieurs étapes qui ont donné la même distribution de pertes de charge. Un exemple de cette distribution est montré sur la figure 4.18. Ce résultat est jugé non représentatif puisqu'il y a un très grand pourcentage de pertes de charge dans le premier quart de l'échantillon et qu'il n'y en a presque plus dans les trois autres. Ceci ne tient pas compte de la zone du filtre où il ne devrait normalement pas y avoir de pertes de charge. Ce résultat anormal nous a poussés à faire des modifications pour les essais suivants. On a également fait une étape avec l'écoulement en sens inverse. Le graphique de la distribution des pertes de charge est présenté sur la figure 4.19. Sur cette figure, l'écoulement se fait de la droite vers la gauche. Il y a beaucoup plus de pertes de charge dans la moitié aval de l'échantillon, de la position 600 mm à 0, ce qui peut être le résultat d'un colmatage de cette zone, observé lors de l'écoulement en sens opposé. On en conclut que l'écoulement est tridimensionnel. Les autres résultats des essais no. 1 et 2 sont présentés aux annexes B et C, respectivement.

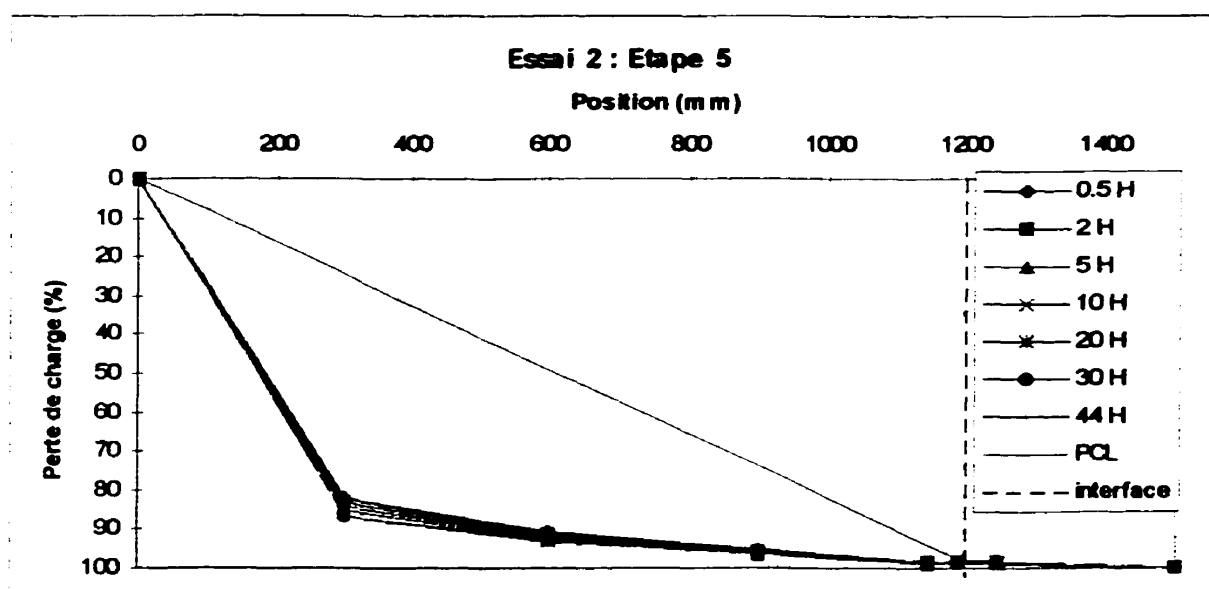


Figure 4.18 : Distribution type des pertes de charge lors des essais no. 1 et 2

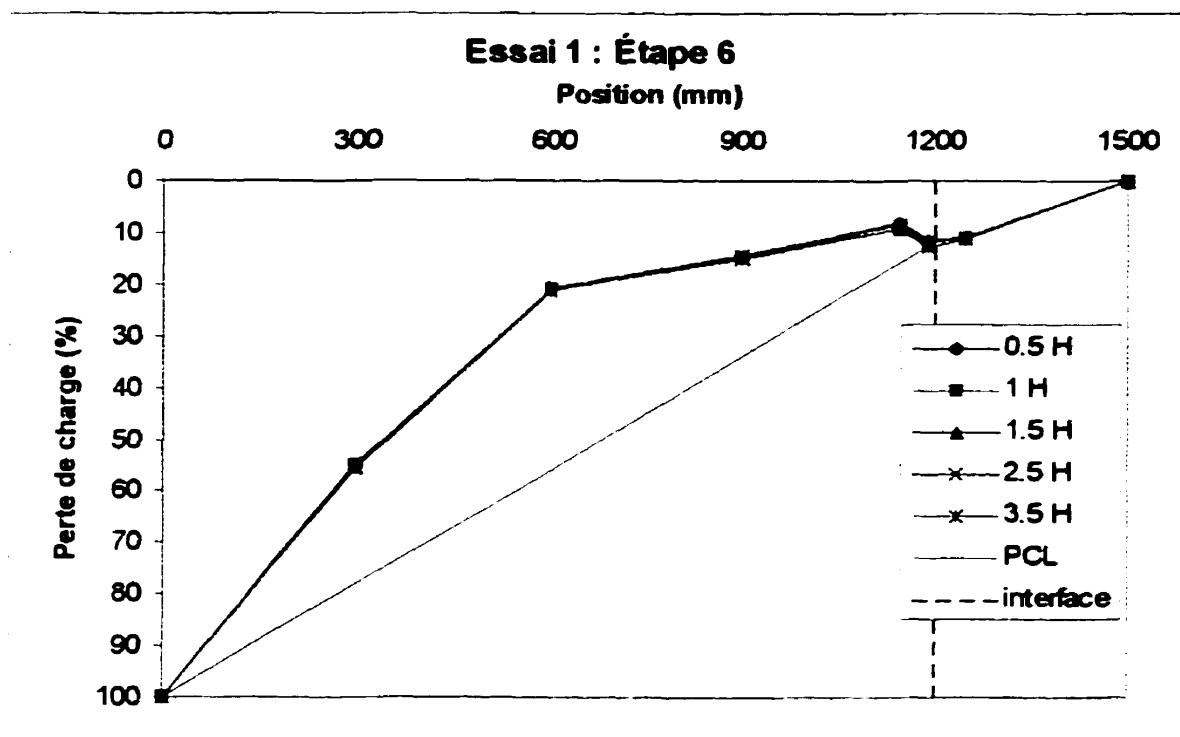


Figure 4.19 : Distribution des pertes de charge pour un écoulement en sens inverse

4.2.2 Résultats de l'essai no. 3

Avant de présenter les résultats, mentionnons que les valeurs présentées sur les graphiques de distribution des pertes de charge, pour les essais no. 3, 4 et 5 et lorsqu'il y a plus d'une étape de représentée, sont les valeurs obtenues à la fin de chaque étape, où la stabilité a été atteinte. Le graphique de la distribution des pertes de charge pour les cinq premières étapes est présenté à la figure 4.20. On peut voir que la distribution évolue au cours des étapes. Lors des deux premières, elle est plutôt linéaire mais il y a une zone de plus faible perte de charge en amont. Lors de la troisième étape, la distribution est linéaire, alors que pour les étapes 4 et 5 la distribution des pertes est concave vers le haut, il y a moins de perte de charge dans la deuxième moitié de l'échantillon que dans la première. La distribution de pertes se situe sous la droite de pertes de charge linéaire (PCL). Notons que pour ces cinq étapes, il n'y a ni perte de

charge dans le diffuseur amont ni dans le filtre. La perméabilité globale de la moraine évolue aussi au cours de ces étapes, passant d'une valeur d'environ 1×10^{-7} m/s pour la première étape à une valeur d'environ 3.3×10^{-7} m/s pour la cinquième étape. Les figures 4.21 et 4.22 présentent la variation des perméabilités globale et locales dans le temps pour les étapes 1 et 5. La division des zones pour les perméabilités locales s'est faite selon la position des capteurs. Les différentes zones sont identifiées sur la figure 4.20 et sont toujours les mêmes pour toutes les distributions de perméabilité locale. Les graphiques de la variation de la perméabilité globale pour les étapes 2, 3 et 4 sont présentés à l'annexe D.

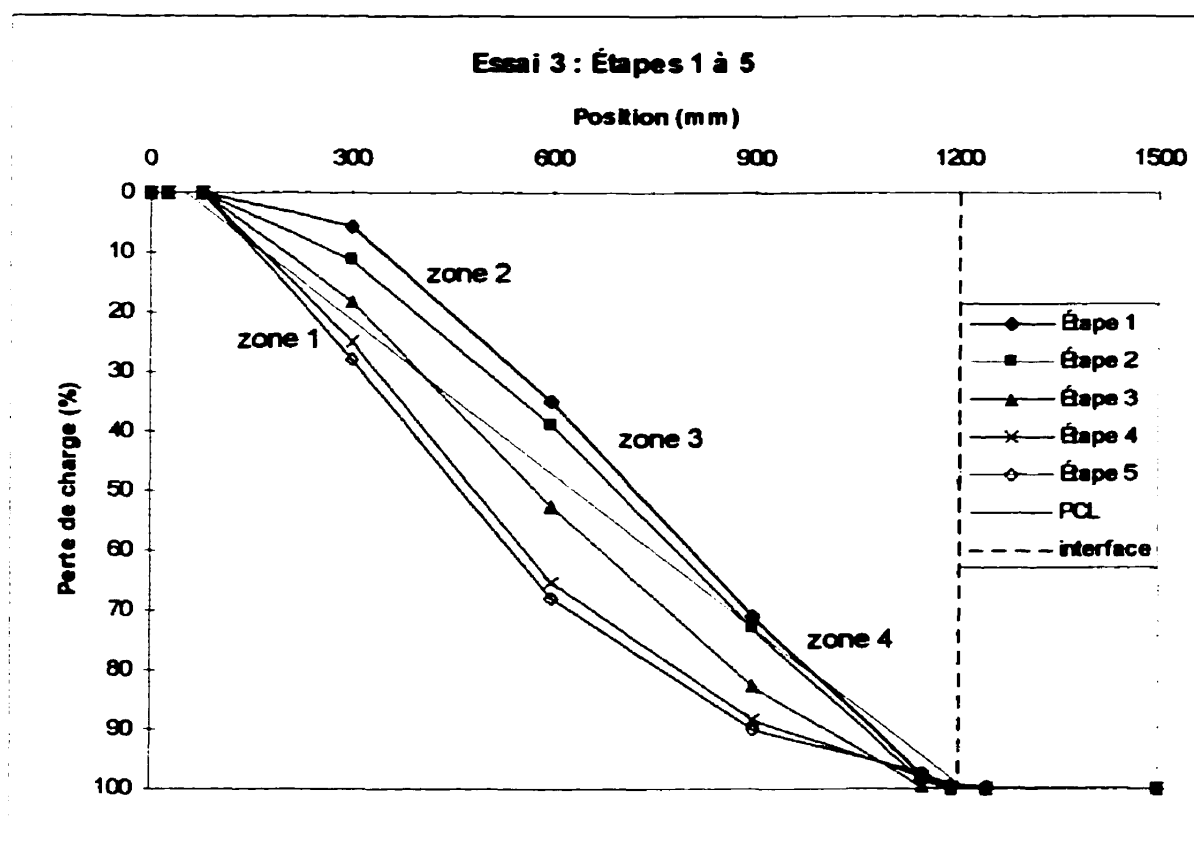


Figure 4.20 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 5

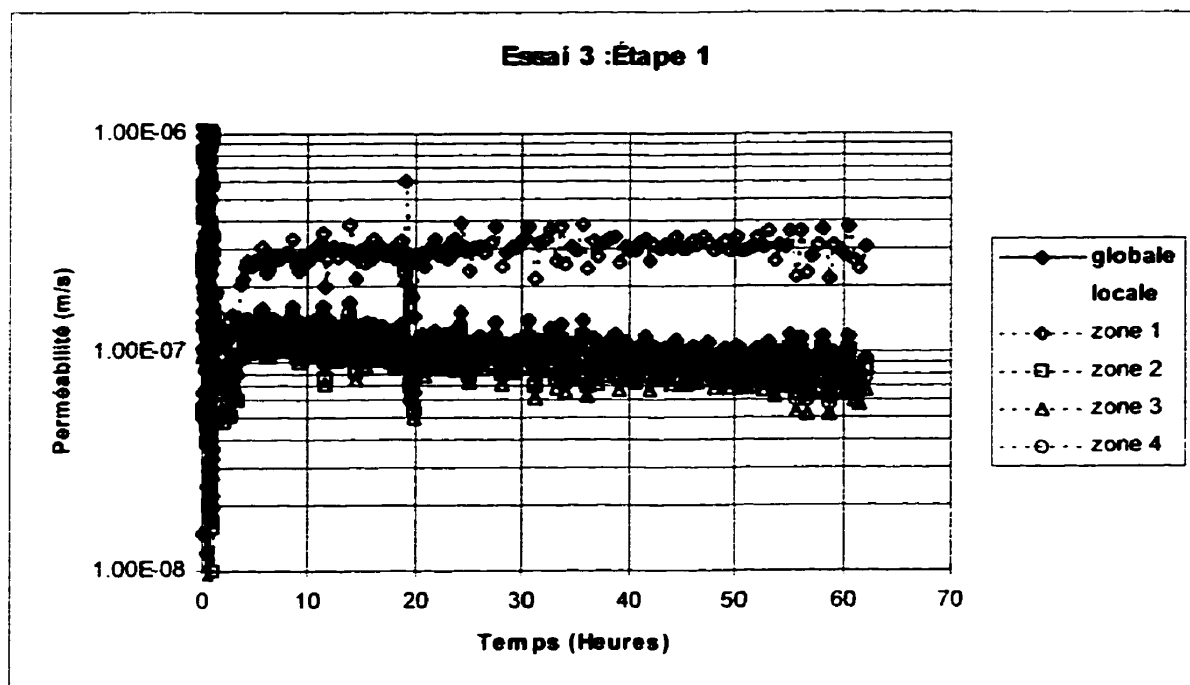


Figure 4.21 : Variation des perméabilités lors de la première étape

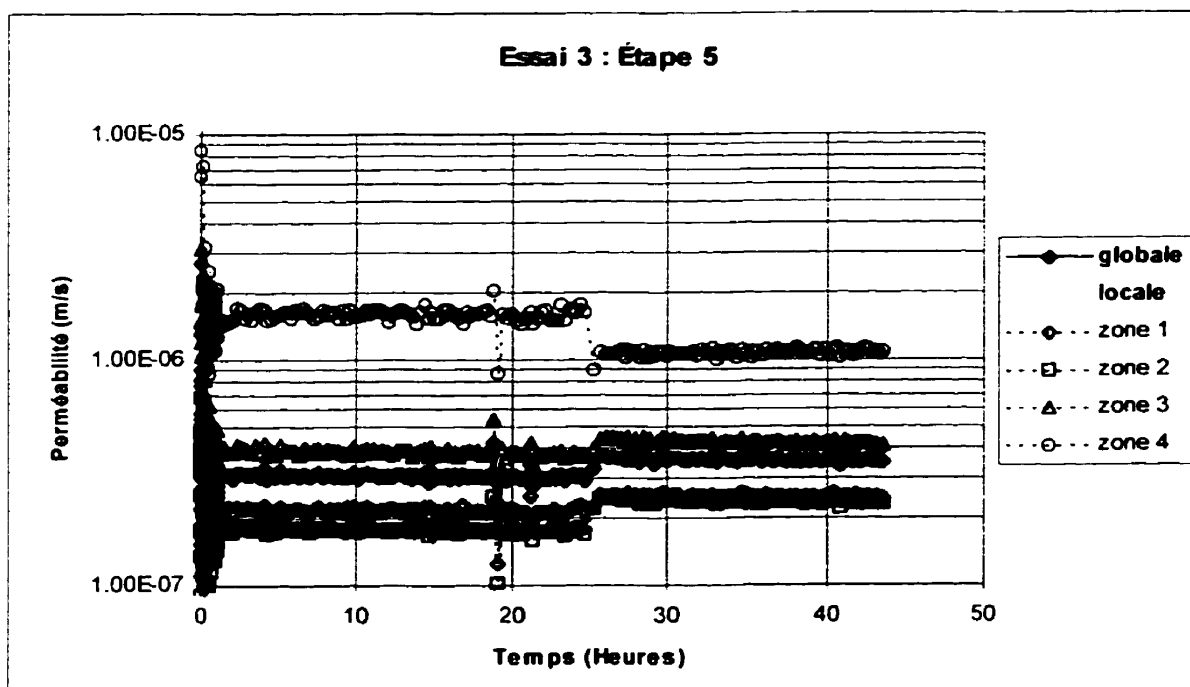


Figure 4.22 : Variation des perméabilités lors de la cinquième étape

Il est normal que la perméabilité augmente à chaque étape puisqu'à chaque fois on augmente P_m et P_{out} , ce qui a pour effet de comprimer plus d'air. Moins il y a d'air dans l'échantillon, plus sa perméabilité est grande. Ceci revient également à dire qu'il y a de plus en plus d'eau dans l'échantillon à mesure que les pressions augmentent. Ceci est confirmé par les graphiques du volume total d'eau dans les burettes montrant que le volume diminue durant chaque étape, indiquant que de l'eau reste dans le sol, (voir fig. 4.23 et 4.24 pour les étapes 1 et 5, les graphiques des autres étapes sont en annexe).

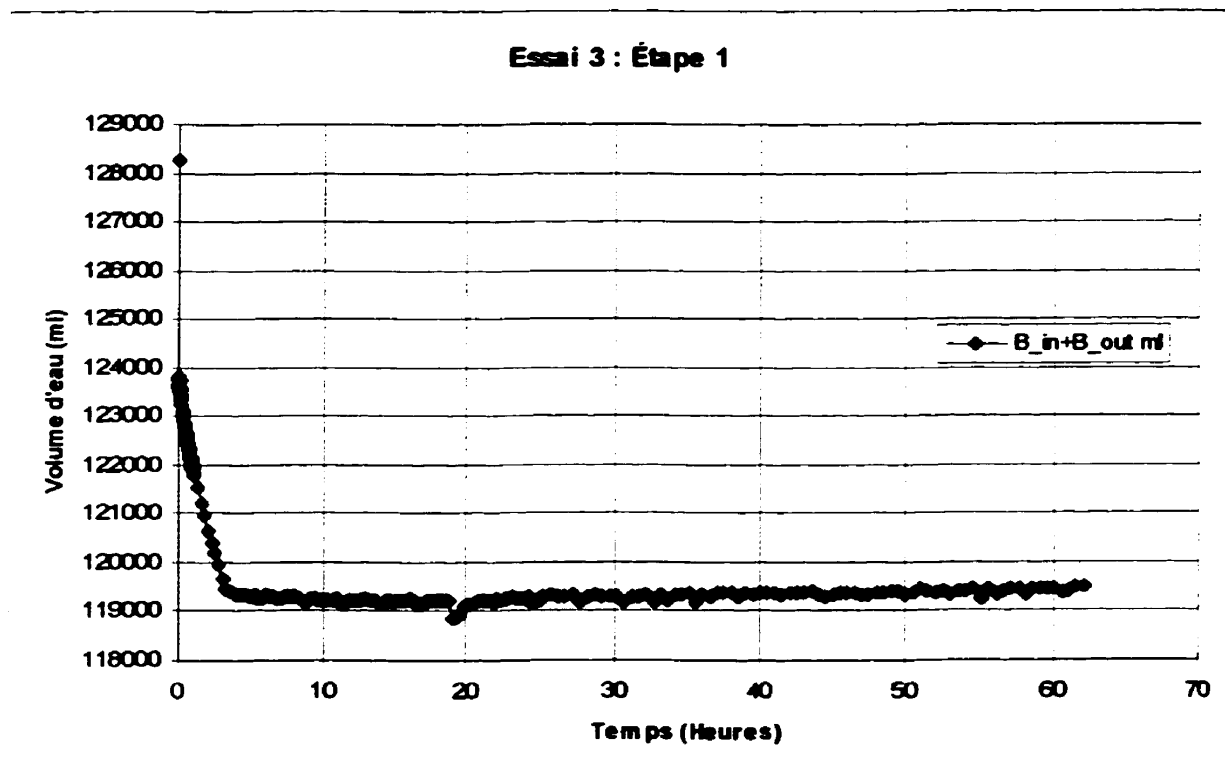


Figure 4.23 : Variation du volume total d'eau dans les burettes pour l'étape 1

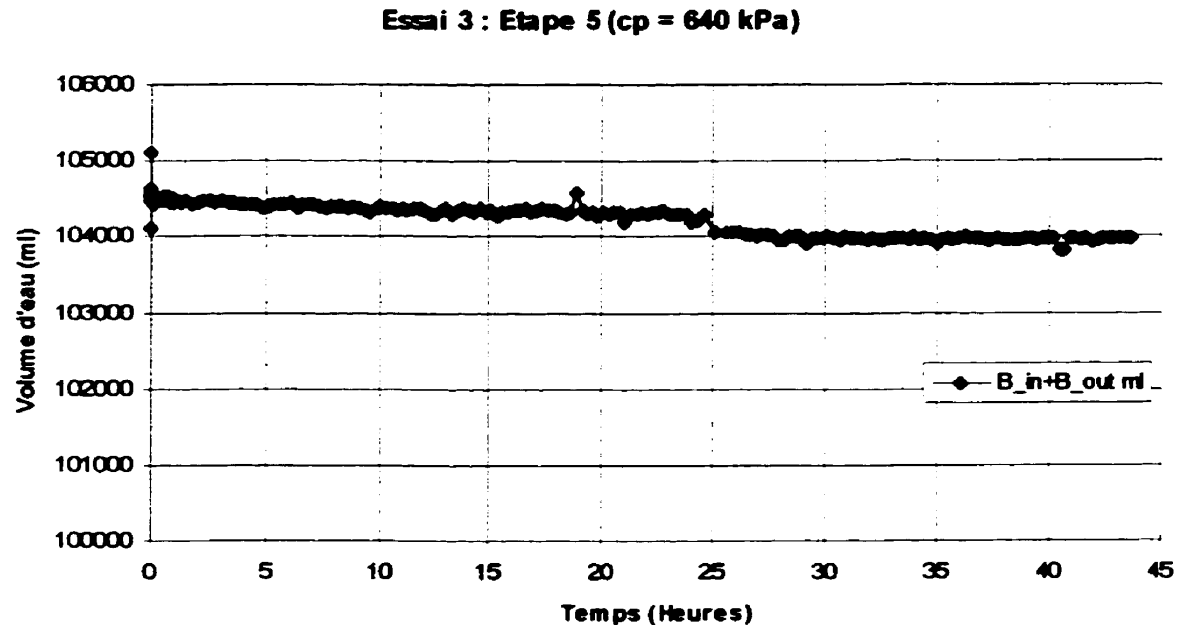


Figure 4.24 : Variation du volume total d'eau dans les burettes pour l'étape 5

La figure 4.25 présente un graphique de la distribution des pertes de charge, en terme de pression, pour les étapes 5 à 8. Lors de ces quatre étapes P_m reste constante et P_{out} passe de 640 kPa à 0, sortie à l'air libre. On peut également noter une évolution de la distribution des pertes de charge. L'étape 5 est concave vers le haut, tel que mentionné précédemment, alors que l'étape 6 est linéaire et les étapes 7 et 8 sont concaves vers le bas, avec plus de pertes de charge dans la deuxième moitié de l'échantillon.

La perméabilité globale diminue au cours de ces quatre étapes, passant d'environ 3.3×10^{-7} m/s pour l'étape 5 à environ 1.4×10^{-7} m/s pour l'étape 8. Le graphique des perméabilités globale et locales de l'étape 8 est présenté à la figure 4.26. La diminution de k peut s'interpréter ainsi : au fur et à mesure que P_{out} est diminué, l'air, sous forme de bulles, peut prendre de l'expansion dans la partie aval de la base. Ainsi, plus il y a d'air dans l'échantillon plus sa perméabilité est faible. On peut d'ailleurs noter, sur la figure 4.25, qu'on a un accroissement des pertes de charge dans la partie aval de la base, ce qui confirme la supposition précédente. De plus, sur la fig. 4.27, le volume total d'eau dans

les burettes augmente durant chaque étape, ce qui confirme que de l'eau sort de l'échantillon, probablement remplacée par de l'air en expansion.

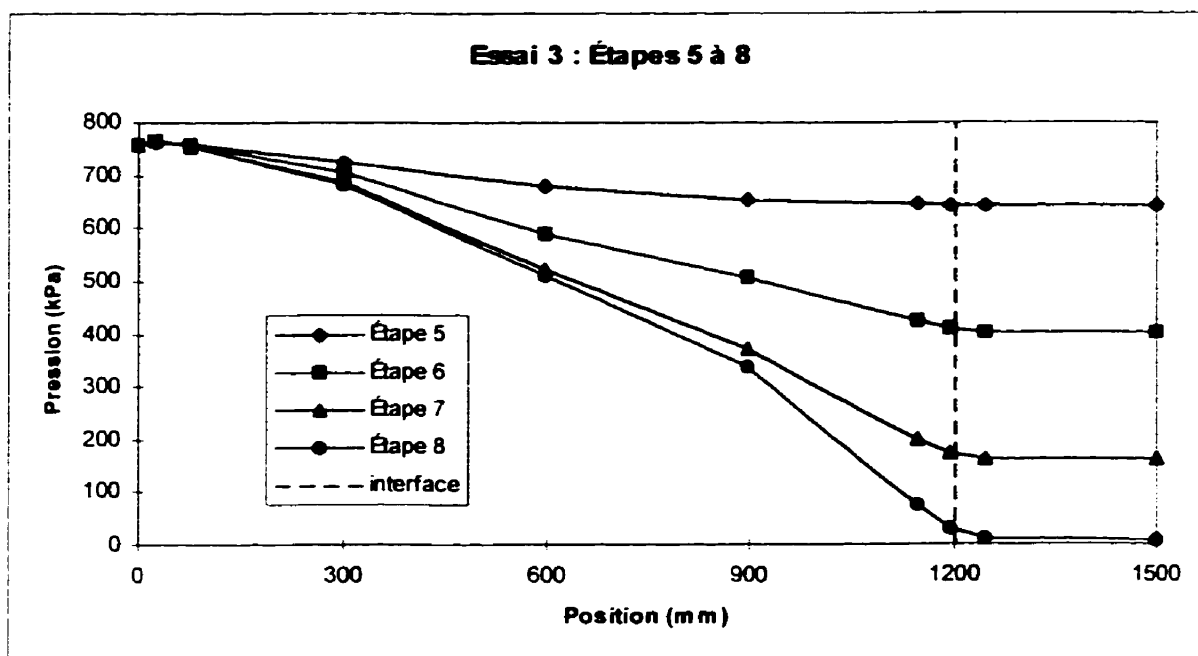


Figure 4.25 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 5 à 8

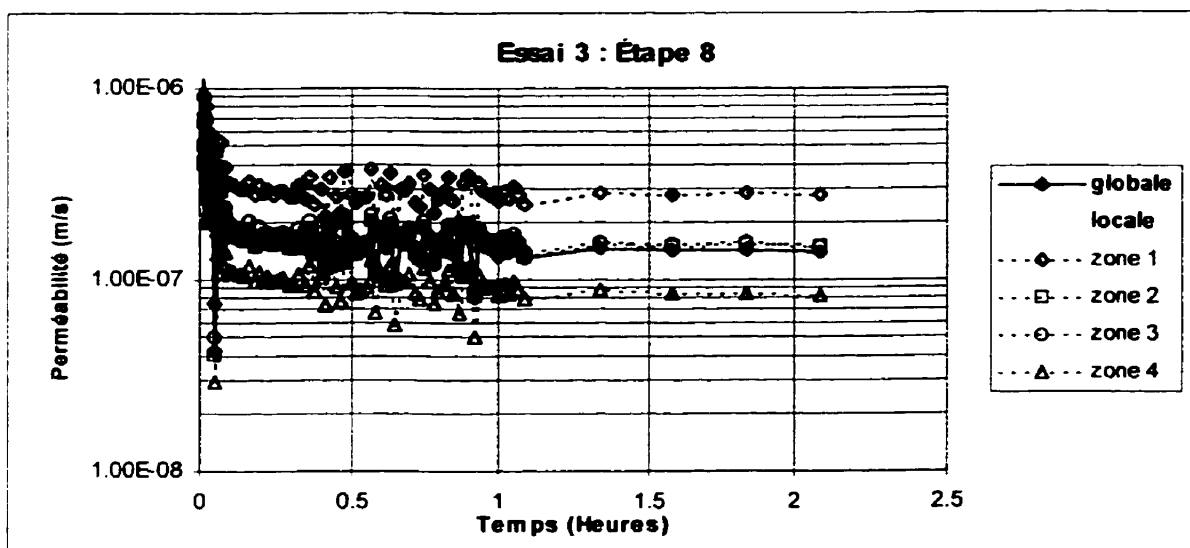


Figure 4.26 : Variation des perméabilités pour l'étape 8

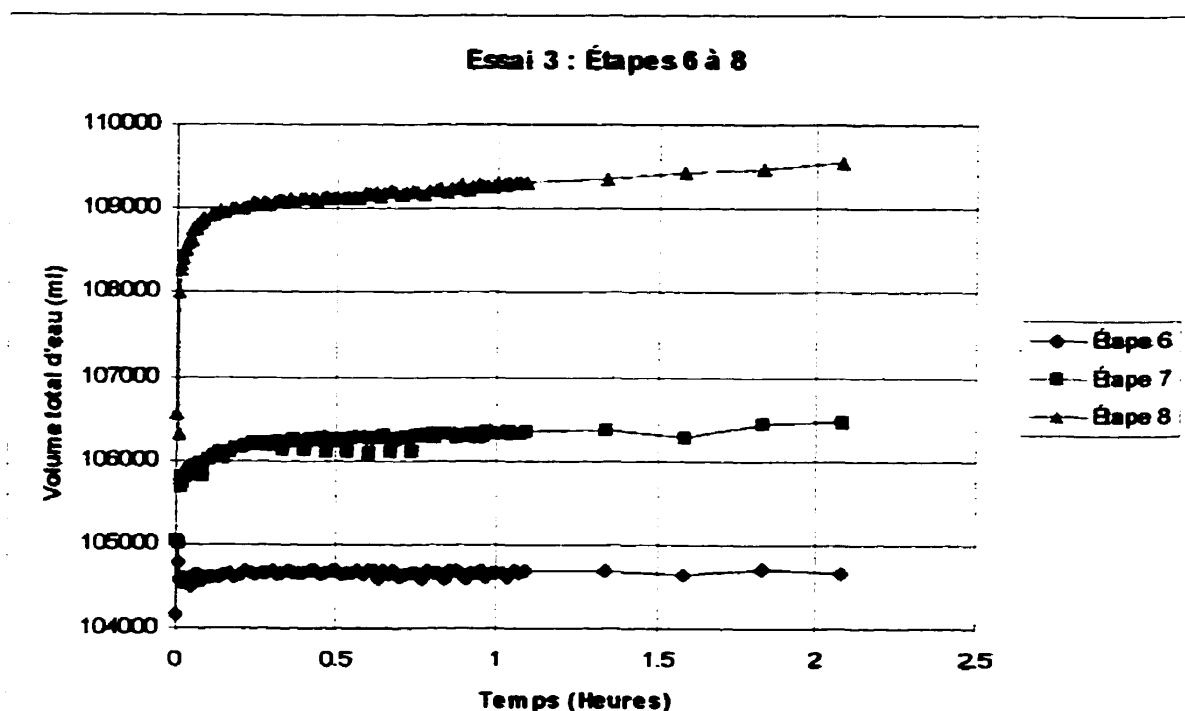


Figure 4.27 : Variation du volume total d'eau dans les burettes pour les étapes 6 à 8

Finalement, la figure 4.28 présente le graphique des pertes de charge pour les étapes 14 à 16, où $P_{out} = 0$ et P_{in} passe de 120 kPa à 760 kPa. On peut voir que les trois distributions de pertes de charge ont à peu près la même allure. Elles sont linéaires pour les trois premiers quarts puis il y a une plus grande concentration de pertes pour le dernier quart, près de l'interface. La perméabilité globale est relativement constante au cours de ces trois étapes, à environ 2×10^{-7} m/s. Le graphique de la figure 4.29 est un exemple de la situation observée pour ces trois étapes.

Les graphiques du volume total d'eau dans les burettes pour les étapes 14 à 16 sont présentés à l'annexe D. On peut seulement dire qu'il y a une diminution du volume total dans les vingt premières minutes où la pression a été augmentée, par la suite il demeure relativement constant.

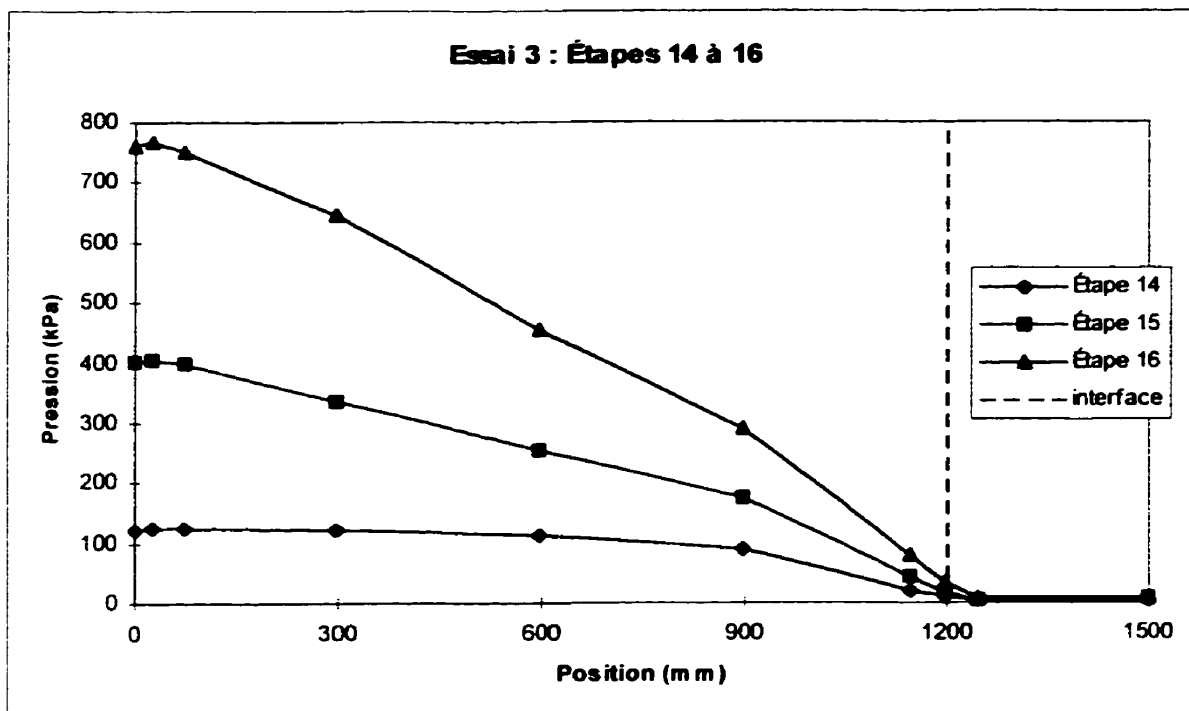


Figure 4.28 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 14 à 16

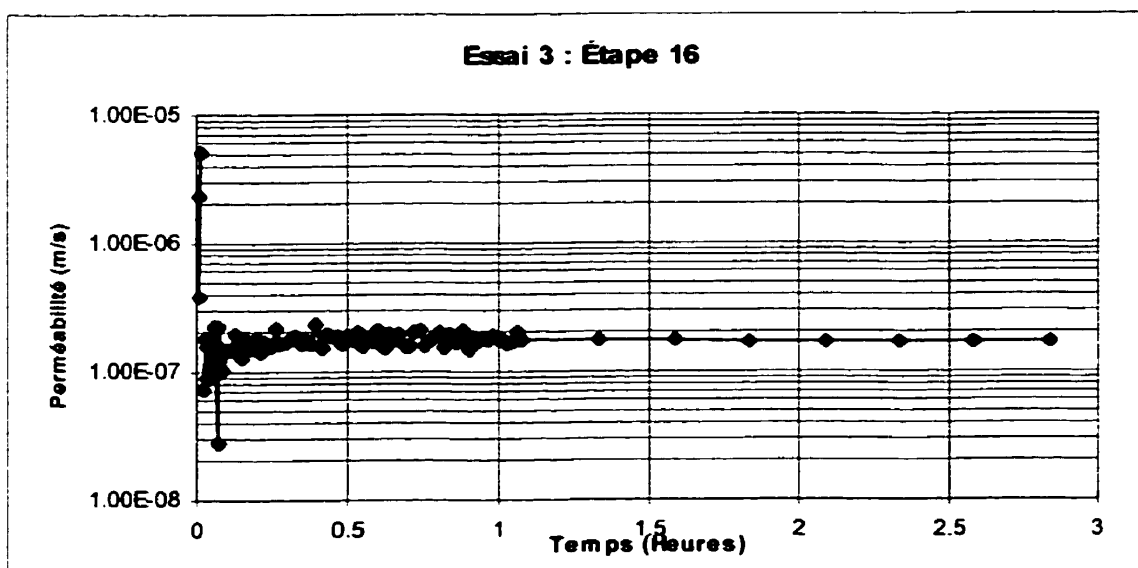


Figure 4.29 : Graphique typique de la perméabilité globale pour les étapes 14 à 16

4.2.3 Résultats de l'essai no. 4

La figure 4.30 présente d'abord la variation de la distribution des pertes de charge lors de la première étape. Au début l'eau n'a pas encore commencé à sortir du filtramètre et la distribution est sous la droite de perte de charge linéaire (PCL). Par la suite, elle aboutit à une distribution qui est au-dessus de la droite PCL et s'en éloigne de plus en plus.

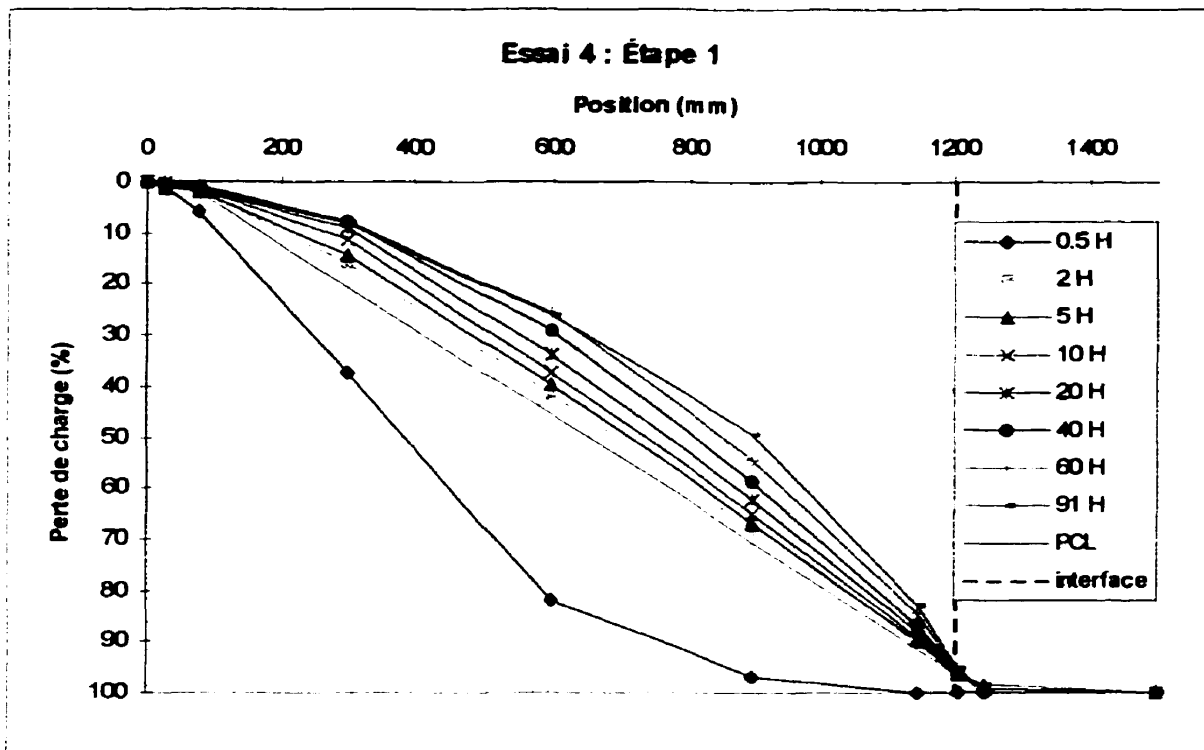


Figure 4.30 : Variation de la distribution des pertes de charge lors de la 1^{ère} étape

La figure 4.31 présente ensuite le graphique de la distribution des pertes de charge pour les cinq premières étapes, où $P_{out} = 0$ et P_{in} passe de 120 à 760 kPa. On peut y remarquer une légère évolution de la distribution alors que celle-ci est plutôt concave vers le bas pour les deux premières étapes et qu'elle devient à peu près linéaire pour les étapes 3, 4 et 5. Notons que lors de la cinquième étape, le débit était trop grand, de sorte

qu'on ne pouvait pas passer la nuit sans arrêter l'écoulement, le gradient a alors été diminué à dix pour la nuit. On avait $P_m = 760$ kPa le jour et $P_m = 120$ kPa la nuit.

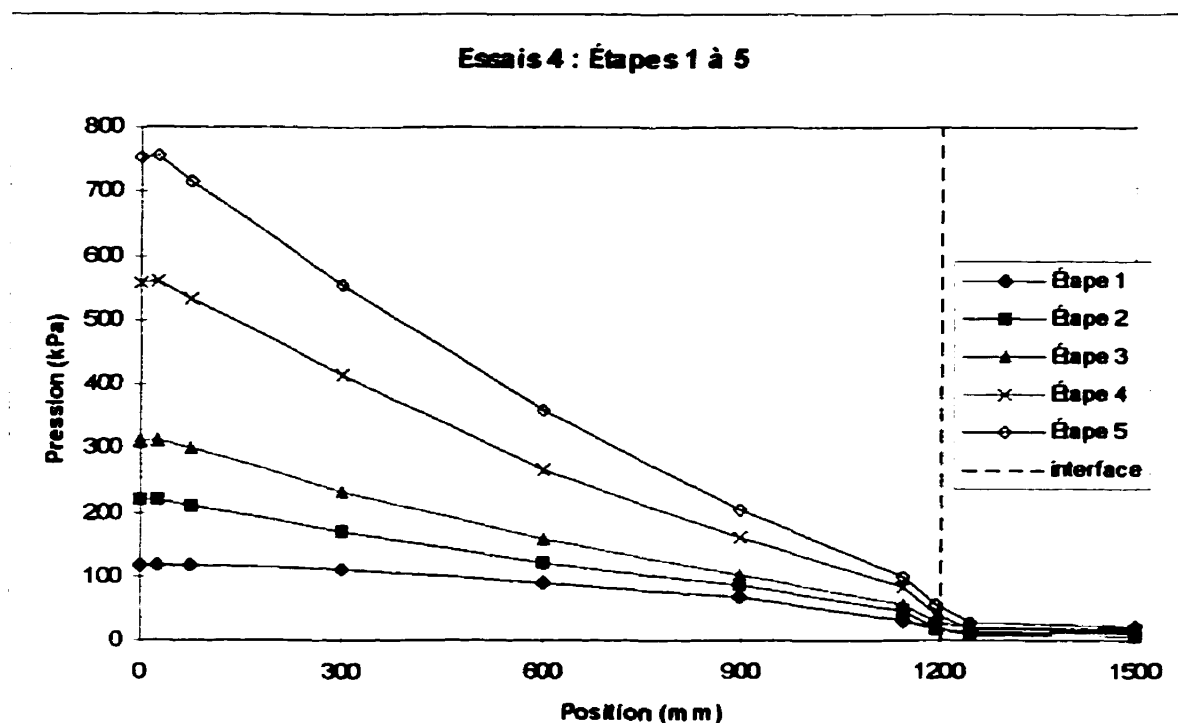


Figure 4.31 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 5

La perméabilité globale subit également une légère évolution. Elle augmente de l'étape 1 à l'étape 3 pour ensuite demeurer à peu près constante jusqu'à l'étape 5, passant d'une valeur d'environ 2×10^{-7} m/s pour l'étape 1 à une valeur de près de 3×10^{-7} m/s pour les étapes 3, 4 et 5. Les bulles d'air contrôlèrent la perméabilité globale. Les figures 4.32 et 4.33 présentent les graphiques de la variation des perméabilités globale et locales pour les étapes 1 et 5, les autres graphiques sont présentés à l'annexe E. Les graphiques du volume d'eau total dans les burettes sont présentés en annexe, ils ne montrent que de légères diminutions dans le temps pouvant s'expliquer par l'augmentation de P_m .

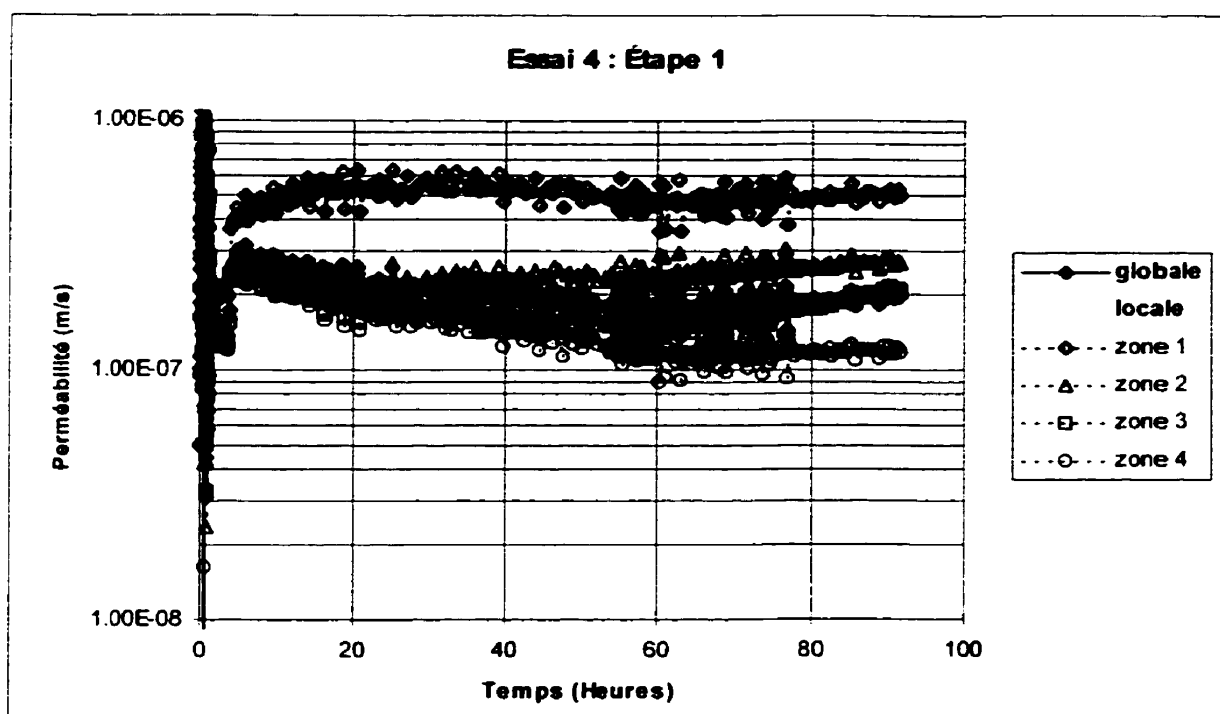


Figure 4.32 : Variation des perméabilités lors de la première étape

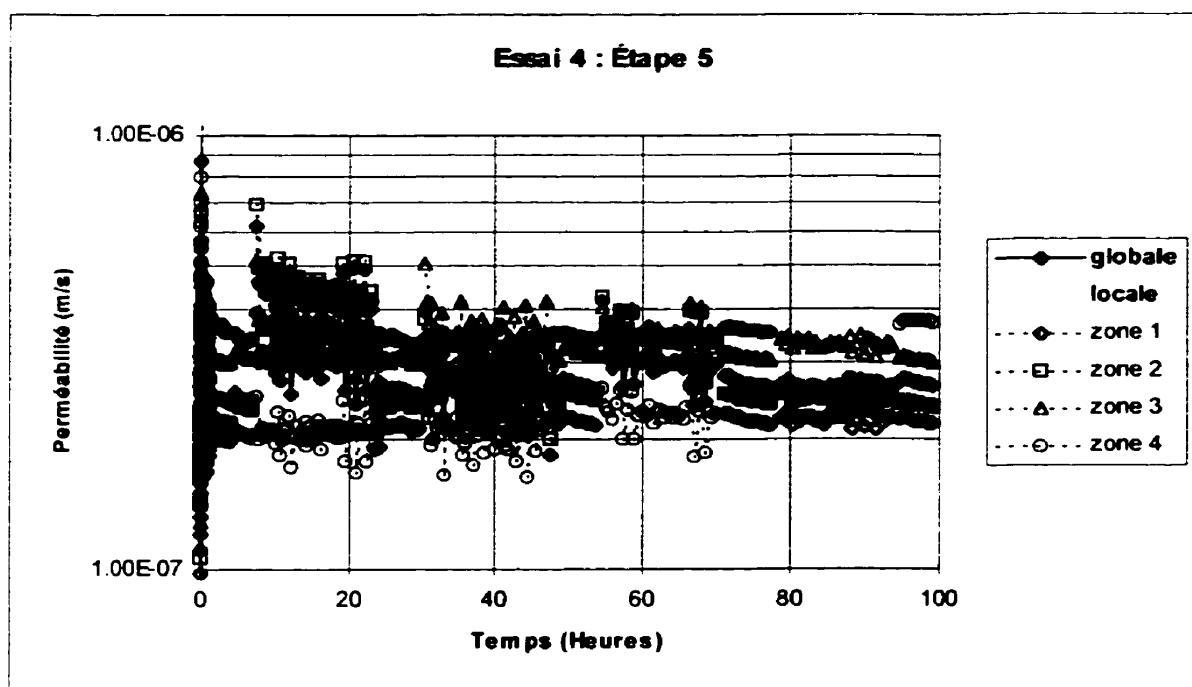


Figure 4.33 : Variation des perméabilités lors de la cinquième étape

La figure 4.34 présente le graphique de la distribution des pertes de charge pour les étapes 5 à 8, où P_m reste constante à 760 kPa et P_{out} passe de 0 à 640 kPa. La distribution est à peu près toujours concave vers le haut, sauf pour l'étape 5 où elle est plutôt linéaire. On peut remarquer qu'il y a de moins en moins de pertes de charge dans la portion près de l'interface, qui peut s'expliquer par l'augmentation de la pression à la sortie qui tend à faire augmenter la perméabilité de cette zone. La perméabilité globale suit cette tendance, passant d'une valeur d'environ 3×10^{-7} m/s pour l'étape 5 à une valeur d'environ 4×10^{-7} m/s pour l'étape 8. Le graphique des perméabilités globale et locales de cette étape est présenté sur la figure 4.35. Les graphiques du volume d'eau total dans les burettes (voir à l'annexe E), ne montrent qu'une faible diminution du volume total en cours d'étape.

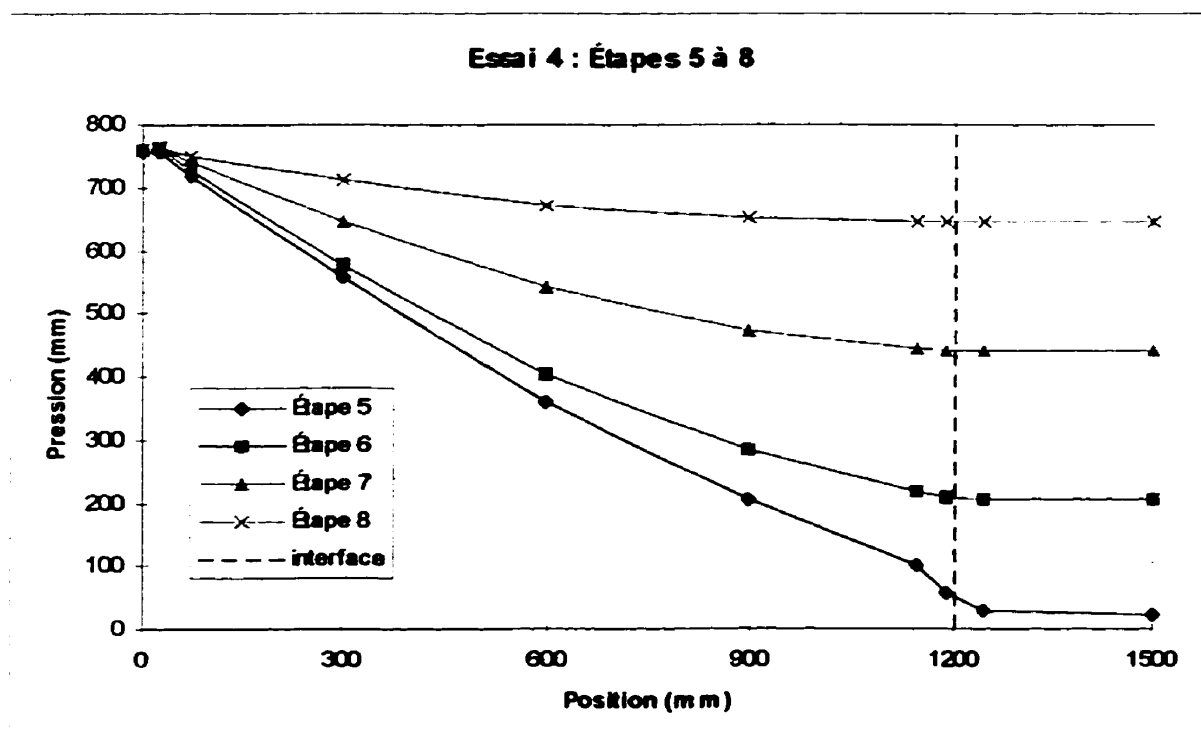


Figure 4.34 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 5 à 8

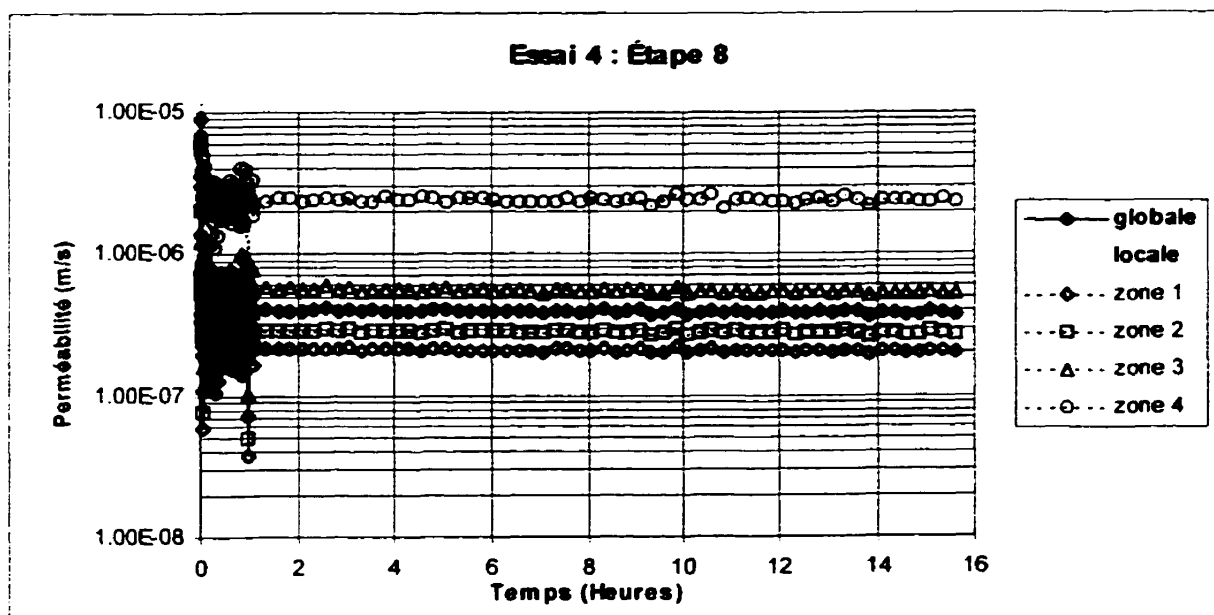


Figure 4.35 : Variation des perméabilités lors de la huitième étape

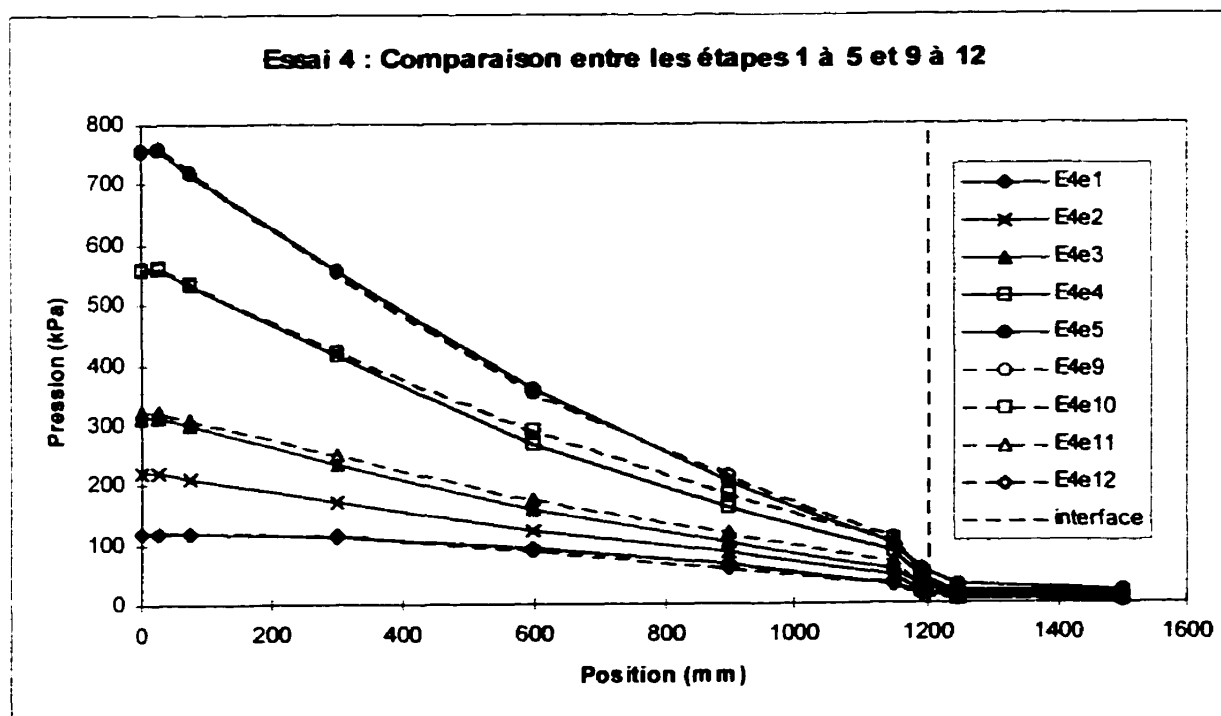


Figure 4.36 : Comparaison entre les étapes 9 à 12 et 1 à 5

La figure 4.36 présente finalement une comparaison de la distribution des pertes de charge entre les étapes 9 à 12 et 1 à 5. Les étapes 9 à 12 sont à peu près les mêmes étapes que les étapes 1 à 5 avec $P_{\text{ext}} = 0$, sauf que pour les étapes 9 à 12, P_{in} est diminuée, de 760 à 120 kPa. Il est intéressant de noter qu'on retrouve presque les mêmes distributions de pertes pour les deux séries d'étapes, en chargement et en déchargement, en comparant les étapes ayant les mêmes pressions à l'entrée et à la sortie : soient les étapes 1 et 12, 3 et 11, 4 et 10 et 5 et 9. Ceci laisse supposer qu'il n'y a pas de déplacement d'air au travers de l'échantillon.

4.2.4 Résultats de l'essai no. 5

La figure 4.37 présente le graphique de la distribution des pertes de charge pour les étapes 1 à 17. Lors de ces étapes, la sortie est laissée à l'air libre et la pression à l'entrée passe de 120 à 760 kPa. À noter cette fois que toutes les distributions ont la même allure que celle observée dans les barrages : concaves vers le bas avec une concentration plus grande de pertes de charge près de l'interface base/filtre. À la différence des autres essais, les incréments de pression ont été plus petits, soient de 40 kPa à chaque fois, ce qui a permis de garder la forme de la courbe de distribution des pertes de charge pour toutes les étapes. Sauf pour la première, la durée des étapes est plus courte que lors des essais précédents.

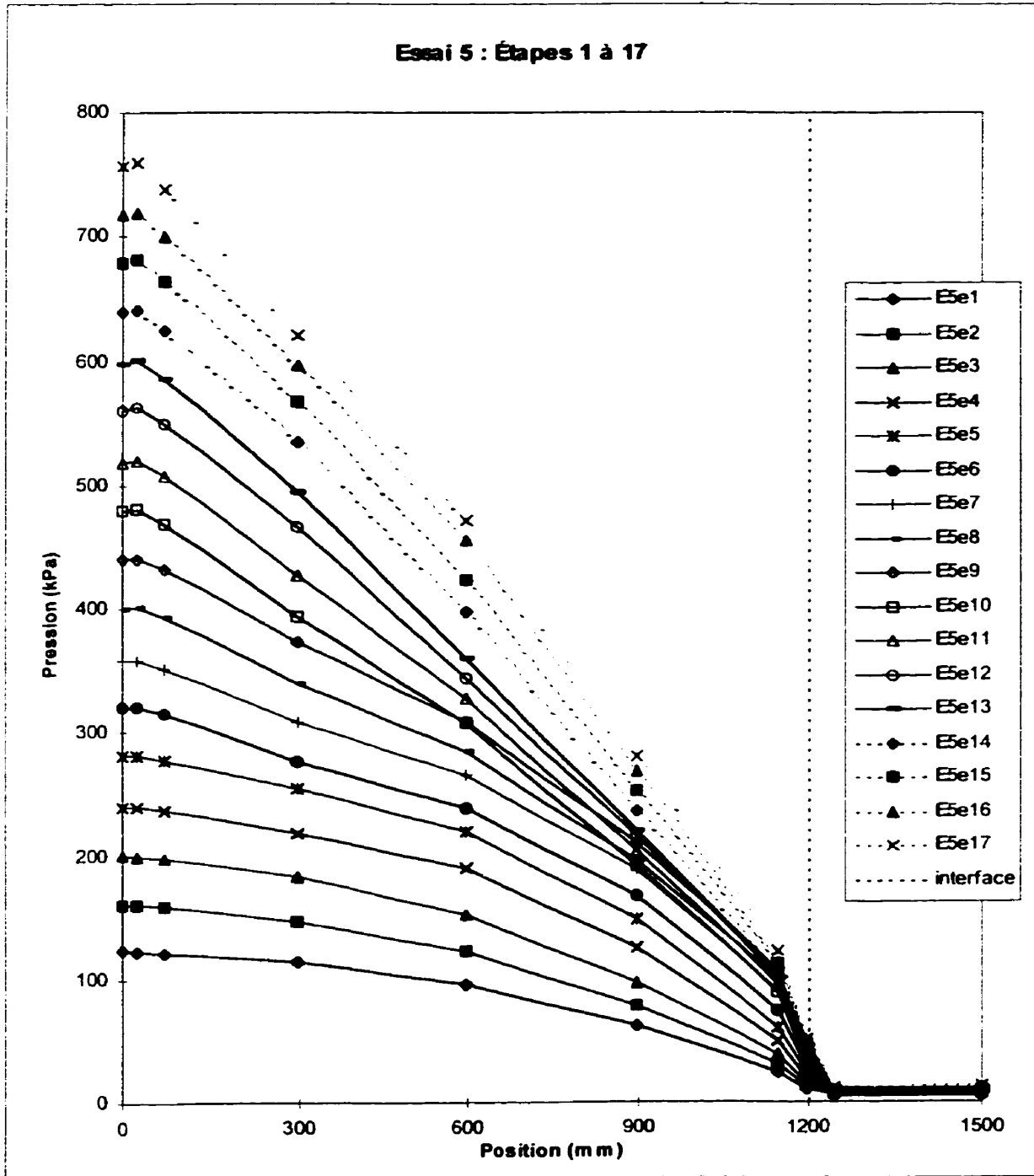


Figure 4.37 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 1 à 17

La perméabilité globale part d'une valeur d'environ 1.3×10^{-7} m/s pour l'étape 1 et augmente jusqu'à une valeur d'environ 2.5×10^{-7} m/s où elle se stabilise pour les étapes restantes. La figure 4.38 présente le graphique des perméabilités globale et locales pour la 1^{re} étape.

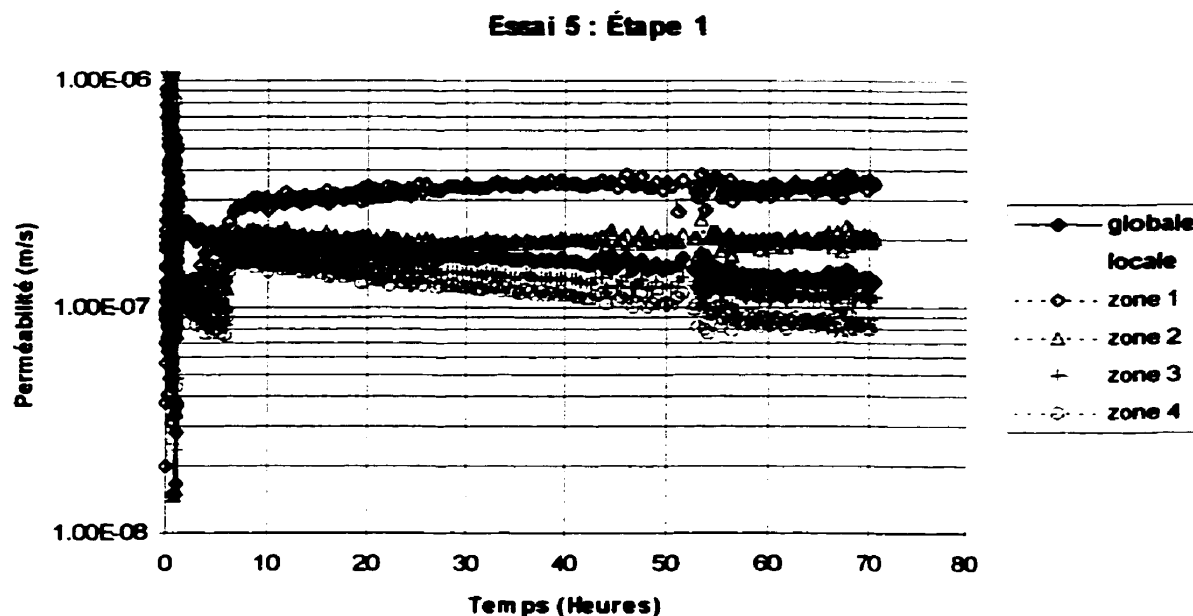


Figure 4.38 : Variation des perméabilités lors de la première étape

La figure 4.39 présente le graphique des pertes de charge pour les étapes 18 a à d et 19, où P_{in} est gardée constante à 760 kPa et P_{out} passe de 0 à 640 kPa. On peut voir que la distribution des pertes de charge est concave vers le bas au début de l'étape 18 et devient à peu près linéaire à l'étape 19. Il y a de moins en moins de pertes de charge près de l'interface base/filtre dû à l'augmentation de P_{out} qui réduit la grosseur des bulles d'air dans la zone de la base près du filtre et augmente du même coup la perméabilité de cette zone. La perméabilité globale augmente également, passant d'une valeur moyenne d'environ 2.6×10^{-7} m/s pour l'étape 18 à une valeur d'environ 3.8×10^{-7} m/s pour l'étape 19. Le graphique des perméabilités globale et locales de l'étape 19 est présenté sur la figure 4.40

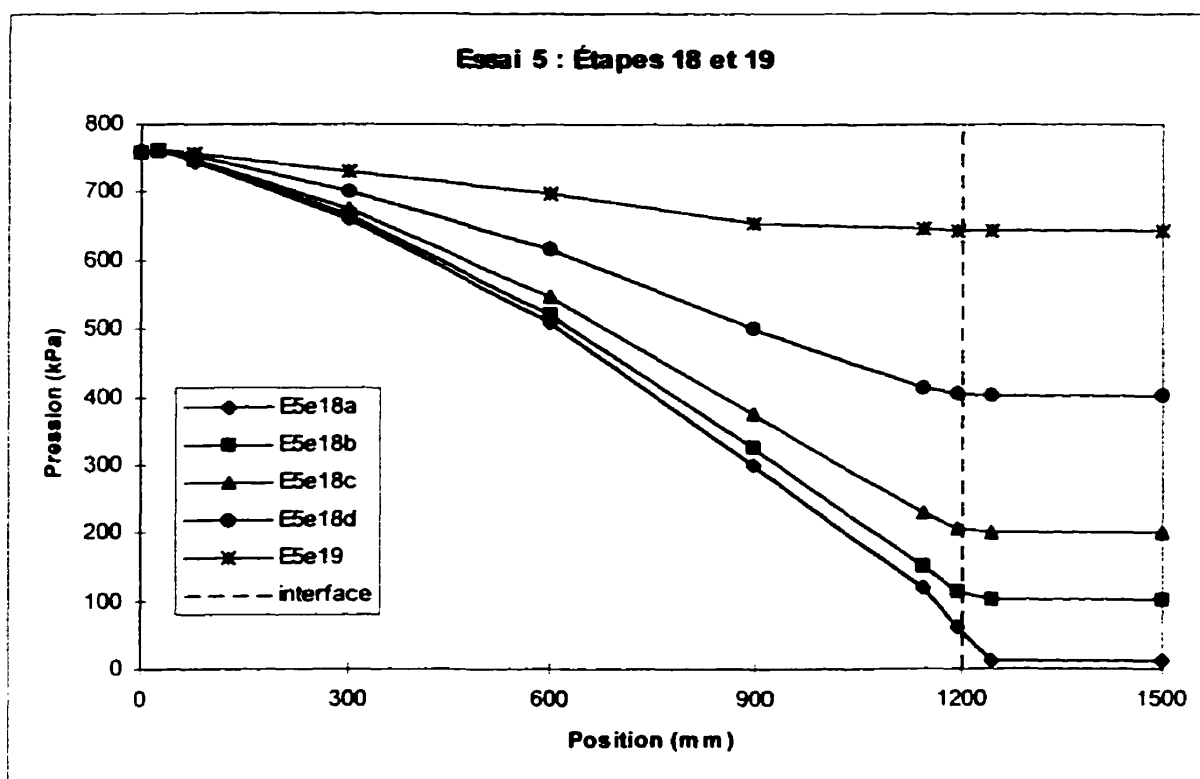


Figure 4.39 : Distribution des pertes de charge à la fin des étapes 18 et 19

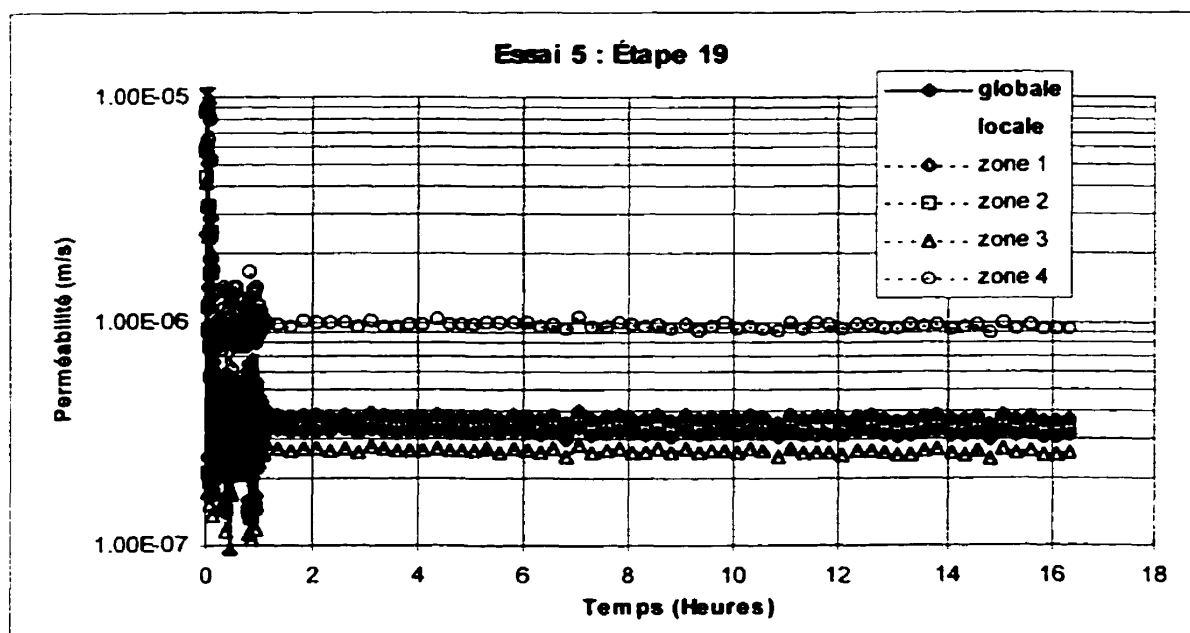


Figure 4.40 : Variation des perméabilités lors de l'étape 19

Les résultats des autres étapes ne sont pas présentés. Notons toutefois qu'on a fait durer l'étape 24 ($P_m = 60$ kPa et $P_{out} = 0$), durant plusieurs semaines sans observer de changement notable sur la distribution des pertes de charges ; la distribution a la même allure que celle de la première étape.

4.2.5 Synthèse des distributions de pertes de charge

On vient de présenter les principaux résultats obtenus pour les cinq essais réalisés avec le grand filtramètre. On peut écarter ceux des deux premiers qui ne sont pas jugés valables. La figure 4.41 présente un graphique comparant les distributions des pertes de charge pour les essais 3, 4 et 5 lorsque $P_{out} = 0$. On peut voir qu'avec une pression de 120 kPa, toutes les distributions sont concaves vers le bas mais après, lorsqu'on augmente P_m , l'essai 4 devient linéaire puis concave vers le haut, alors que les essais 3 et 5 demeurent concaves vers le bas. Mentionnons que les étapes de l'essai 3 sont un rechargement, c'est-à-dire que P_m a été augmenté puis diminué et augmenté à nouveau avec $P_{out} = 0$ (voir le tableau 3.5). Pour les essais 4 et 5 il s'agit des premières étapes. Pour l'essai 5, il a fallu plus d'étapes pour atteindre $P_m = 760$ kPa puisque les incréments de pression sont plus faibles.

En ce qui concerne l'augmentation de P_{out} (voir les figures 4.25, 4.34 et 4.39), la distribution des pertes pour l'essai 3 est concave vers le bas, puis linéaire puis concave vers le haut. Pour l'essai 4 elle est toujours concave vers le haut et pour l'essai 5 elle est toujours concave vers le bas sauf pour la dernière étape où elle est linéaire.

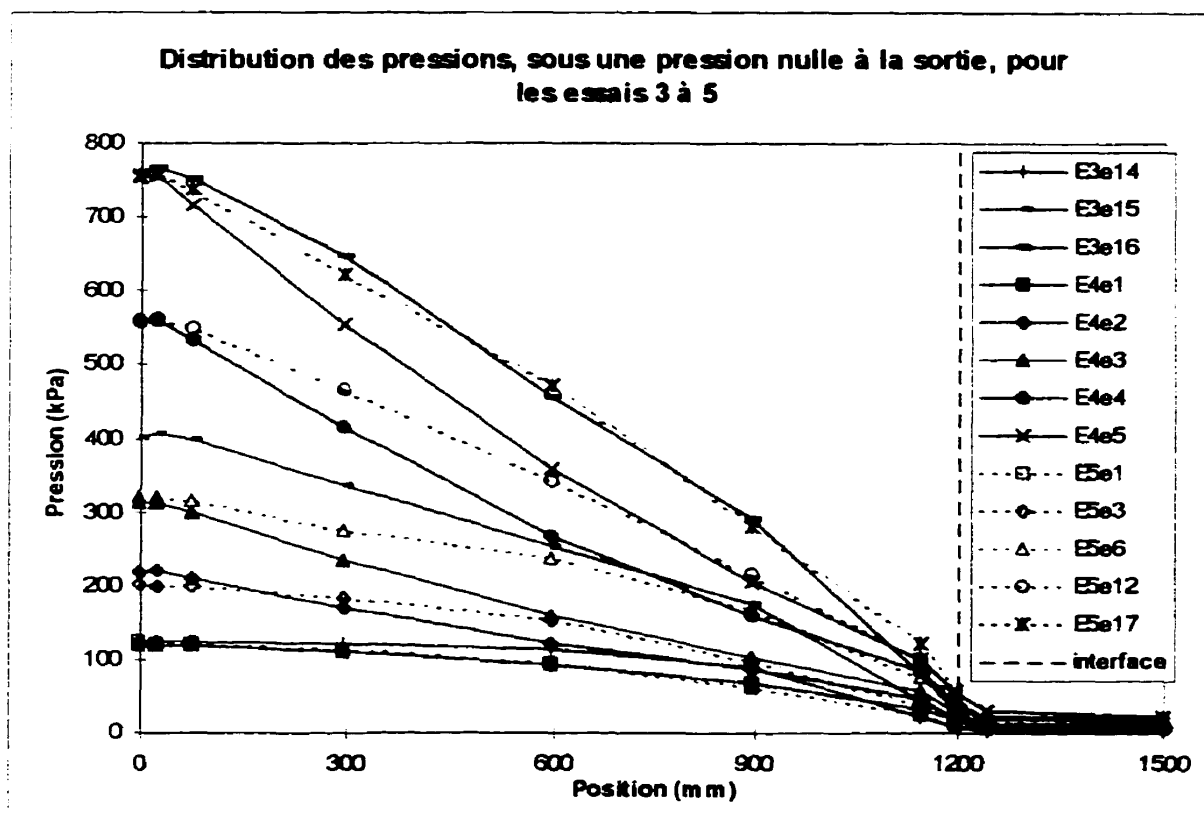


Figure 4.41 : Comparaison des essais 3, 4 et 5 avec la sortie à l'air libre

4.2.6 Analyses granulométriques

Les figures 4.42 à 4.44 présentent les courbes granulométriques alors que les figures 4.45 et 4.46 présentent les variations de la granulométrie des filtres fin et grossier. Sur les trois premières figures, on peut constater qu'il n'y a aucune variation notable entre les courbes granulométriques avant et après essai. Il faut toutefois se rappeler que les analyses granulométriques n'ont pas été effectuées sur l'échantillon au complet mais seulement sur le tiers. De plus, la courbe intitulée «interface» a été obtenue en récupérant du sol sur une largeur d'environ 3 cm de part et d'autre de l'interface bvase/filtre.

Les figures 4.45 et 4.46 font ressortir les variations de la granulométrie du filtre. Ces variations sont somme toute relativement faibles, moins de 5%. Elles peuvent être causées par le déplacement de particules mais aussi par les manipulations effectuées pour récupérer les tranches de filtre désirées.

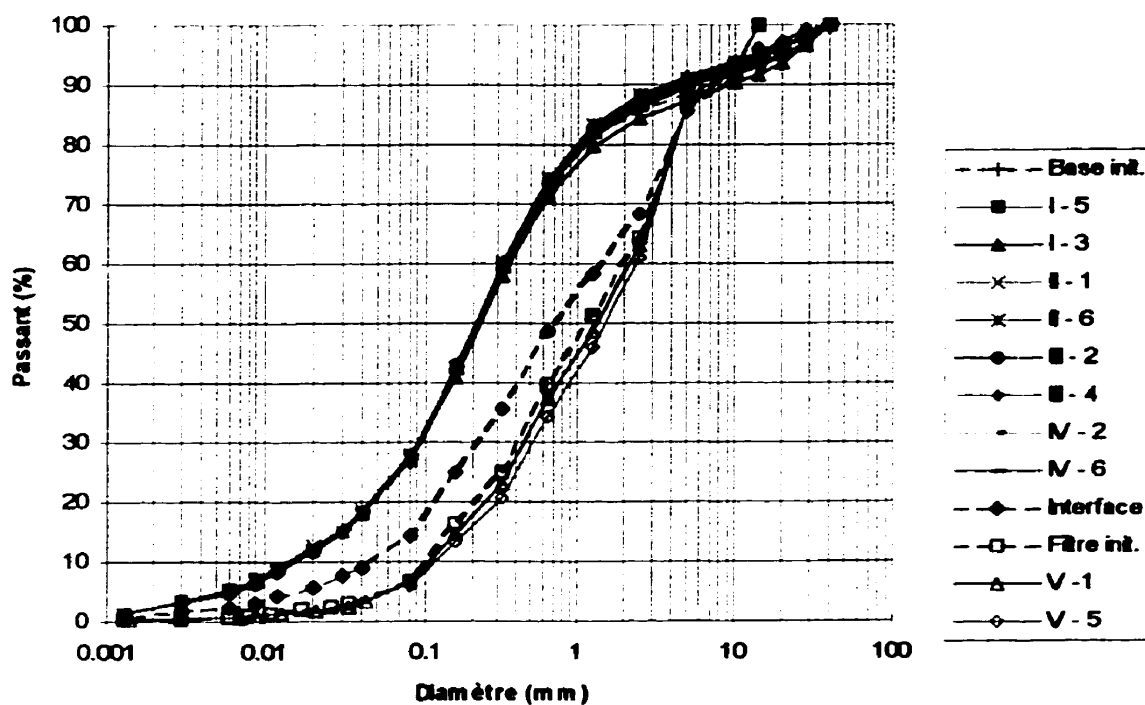


Figure 4.42 : Courbes granulométriques de l'essai no. 2

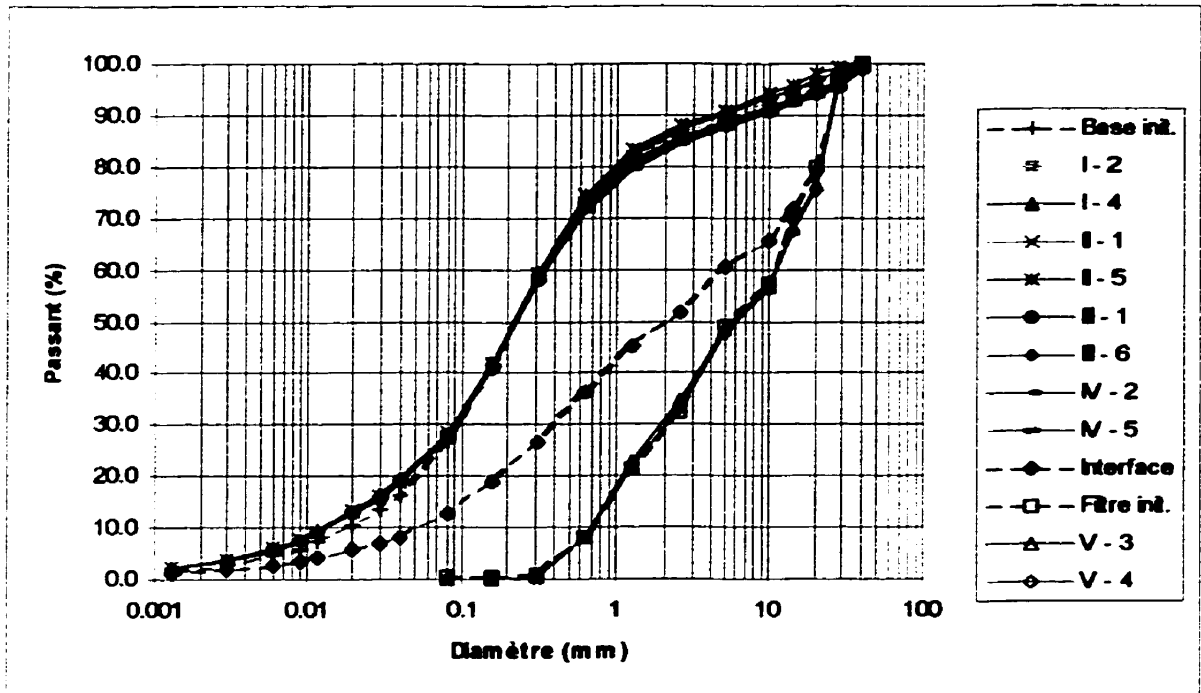


Figure 4.43 : Courbes granulométriques de l'essai no. 3

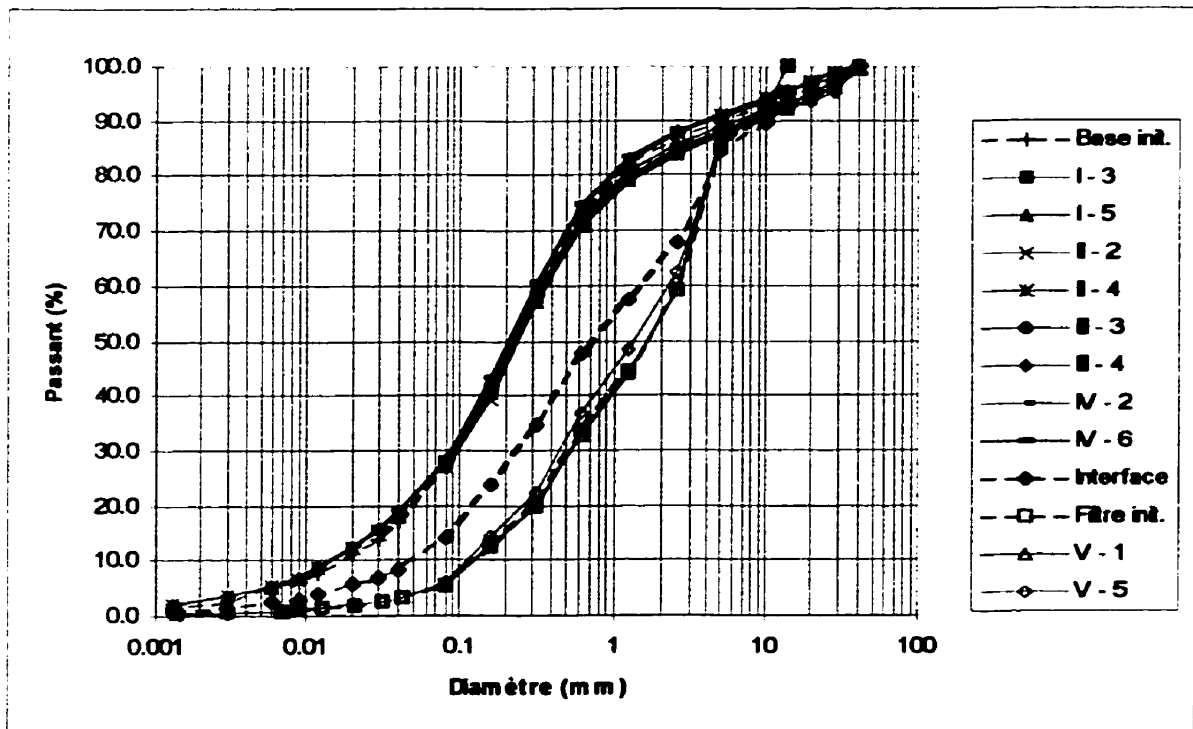


Figure 4.44 : Courbes granulométriques de l'essai no. 4

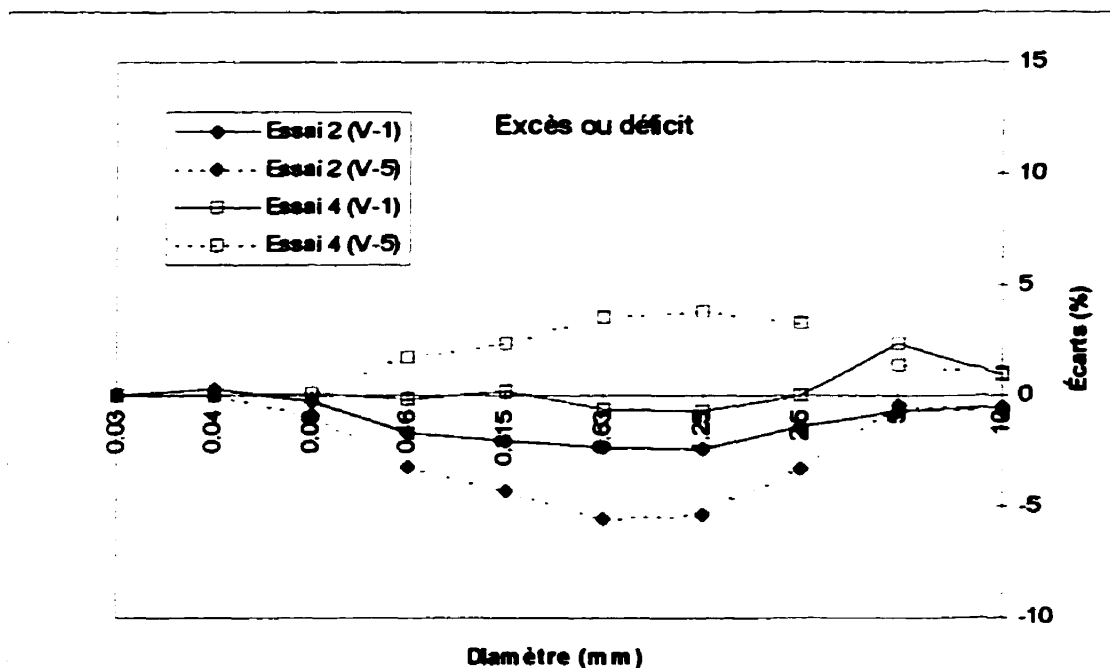


Figure 4.45 : Excès ou déficit de particules dans le filtre fin

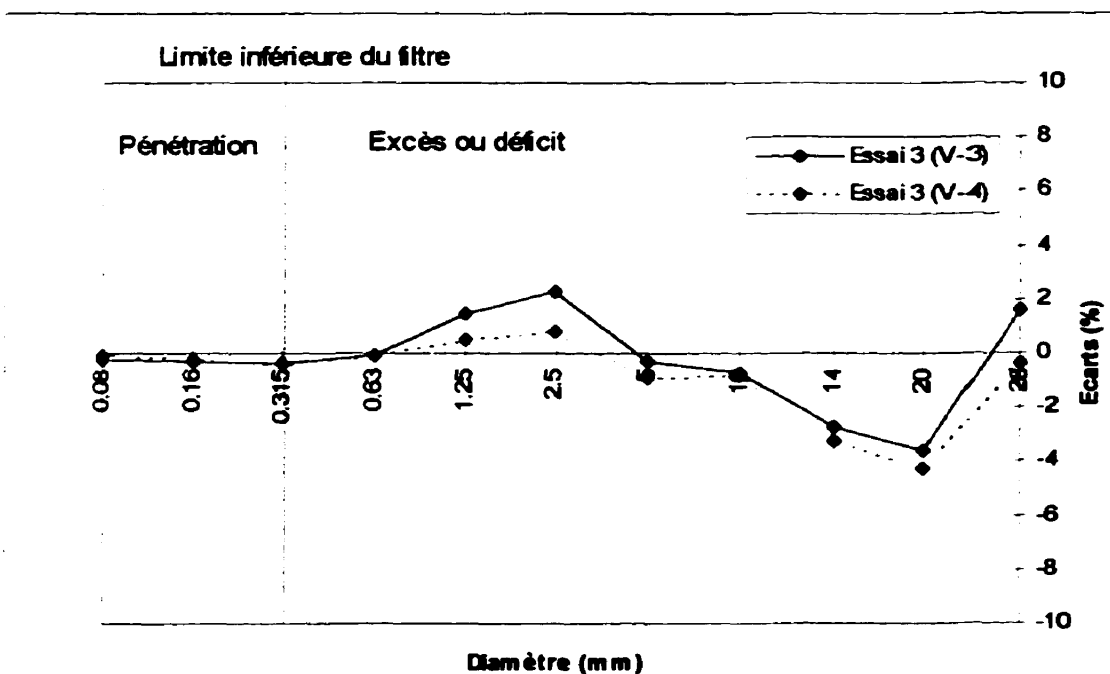


Figure 4.46 : Excès ou déficit de particules dans le filtre grossier

CHAPITRE 5

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 CONCLUSION

À l'origine le but de cette recherche était de déterminer si la distribution anormale de pertes de charge observée au barrage principal de LG4 pouvait être causée par une migration des particules fines du noyau, tout en vérifiant la stabilité de la moraine.

Pour atteindre ce but on a réalisé des essais en utilisant deux montages différents, l'un avec un petit filtramètre, le même que Dulau, pour vérifier la stabilité de la moraine et l'autre avec un filtramètre horizontal, beaucoup plus volumineux que l'autre appareil, avec écoulement horizontal pour simuler les mêmes conditions que celles rencontrées au barrage principal de LG4.

Les résultats n'ont montré aucune variation significative entre les courbes granulométriques d'avant et après essai pour les deux filtramètres. Il y a eu certains écarts entre les courbes à l'occasion avec le petit filtramètre. Toutefois, étant donné que la grande majorité des résultats ne montrent aucune variation, on peut dire que la moraine reconstituée à 12% de fines est stable. De plus, en extrapolant ces résultats et ceux de Loungnarath et Lafleur (1996) et Dulau (1997) et en ajoutant ceux obtenus avec le filtramètre horizontal, on peut dire que la moraine employée à LG4 est stable. Ceci était prédit par la théorie de Kenney et Lau (voir les figures en annexe). Il pourrait toutefois y avoir migration de faibles quantités de particules qui ne sont pas décelables par la méthode employée.

En ce qui concerne les pertes de charge, les résultats obtenus avec le petit filtramètre ne font que confirmer la théorie, à savoir que la distribution des pertes de charge est linéaire lorsqu'on a un écoulement d'eau, dans un milieu homogène.

Avec le filtramètre horizontal, on a obtenu la distribution de pertes de charge observée au barrage principal de LG4, soit une plus grande concentration de pertes de charge près de l'interface base/filtre ou noyau/filtre sur le terrain. De plus, tel que mentionné précédemment, on n'a jamais pu conclure à partir des analyses granulométriques à une migration de particules, donc la distribution de pertes de charge obtenue expérimentalement ne peut être associée à ce phénomène. On peut appliquer ces conclusions au cas de LG4. Pour expliquer cette distribution anormale, il reste moins d'hypothèses étant donné qu'en plus, les résultats ont montré que la base était bien homogène, toutes les tranches ayant la même granulométrie, de même pour la teneur en eau. Une hypothèse reste, à savoir qu'il pourrait y avoir une plus grande quantité d'air, sous forme de bulles, près de l'interface base/filtre qu'ailleurs dans la base. La question de l'air n'a été que brièvement abordé lors des essais parce que le montage n'était pas conçu pour bien étudier cet aspect.

On a observé lors des essais 3, 4 et 5 une distribution de pertes de charge semblable à celle retrouvée à LG4. Lors des essais 3 et 4, on avait cette distribution pour la première étape, avec une pression de 120 kPa à l'entrée et avec la sortie à l'air libre, mais par la suite, en augmentant les pressions, on perdait cette distribution. Toutefois, pour l'essai 5, on a pu obtenir, conserver et retrouver cette distribution. La distribution des pertes de charge de la première étape était toujours semblable à celle de LG-4, puis en augmentant les pressions graduellement par bonds de 40 kPa, on a pu conserver la distribution obtenue à l'étape 1. De plus, si cette distribution est perdue, suite à un arrêt de l'écoulement où toutes les pressions s'égalisent et qu'on veuille la retrouver, on n'a qu'à remettre les pressions de l'étape 1 jusqu'à stabilisation puis augmenter graduellement les pressions jusqu'à celles désirées.

Cette étude suit celles de Loungnarath (voir Loungnarath et Lafleur (1996)) et de Dulau (voir Dulau 1997). Ce projet avait pour objectif de vérifier si la migration de particules fines au sein de la moraine était la cause de l'anomalie. On en conclut que la moraine de LG4 est stable et que la migration de particules fines n'est pas la cause de l'anomalie observée.

5.2 RECOMMANDATIONS

5.2.1 Petit filtramètre

Les principales recommandations sont les mêmes que celles formulées par Dulau en insistant sur l'emploi d'une cellule plus longue pour augmenter la distance entre les capteurs, de façon à améliorer leur prise de mesure respective.

5.2.2 Filtramètre horizontal

- Modifier le montage pour être en mesure de connaître la quantité d'air qui sort lorsqu'il y a écoulement;
- mettre un capteur plus près de l'interface moraine/filtre, du côté du filtre, que celui présent actuellement, ou déplacer ce même capteur plus près de l'interface;
- faire des analyses à différentes teneurs en eau :
 - différentes teneurs en eau lors d'un essai ; par exemple, teneur en eau en aval différente de la teneur en eau en amont;
 - teneur en eau uniforme pour un essai mais la changer pour l'essai suivant;
- incliner le filtramètre, pour faciliter l'évacuation de l'air.

RÉFÉRENCES

ATMADZIDIS, D. (1987). An experimental study of sand migration in gravel. Neuvième Congrès Européen de mécanique des sols et des travaux de fondation, Dublin, 887-890.

AUVINET, G. & BOUVARD, D. (1983). Effet d'échelle géométrique dans les milieux granulaires. Revue Française de Géotechnique, vol. 25, 63-69.

BLACK, D.K. & LEE, K.L. (1973). Saturating laboratory samples by back pressure. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 99, 75-93.

CEDERGREN, H.R. (1989). Seepage, Drainage, and Flow Nets, 3^{ème} édition, John Wiley & Sons, 465 p.

DULAU, J.-C. (1997). Étude de la filtration des moraines potentiellement suffosives, Mémoire M. Sc. A., École Polytechnique de Montréal, 179 p.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, 517 p.

FRY, J.J., FLAVIGNY, E. & TAQUET B. (1987). Lois de perméabilité dans les barrages en terres grossières. Neuvième Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Dublin, 39-42.

HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Traduite par M. Jean Lafleur, 808 p.

KENNEY, T.C. & LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, no. 2, 215-225.

KENNEY, T.C. & LAU, D. (1986). Internal stability of granular filters: Reply. Canadian Geotechnical Journal, vol. 23, 420-423.

KENNEY, T.C. & WESTLAND, J. (1993). Laboratory Study of Segregation of Granular Filter Materials. Proceedings of the First International Conference Geo-Filters, Karlsruhe, Germany, 313-319.

LAFLEUR, J. (1984). Filter testing of broadly graded cohesionless tills. Canadian Geotechnical Journal, vol. 21, 634-643.

LAFLEUR, J. (1998). Pore pressure distribution in dams with compacted moraine cores. Rapport intermédiaire no. 4 préparé pour Hydro-Québec, mars 1998, Projet CDT P1982, École Polytechnique, 24 p.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. & ROLLIN, A.L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, no. 12, 1747-1768.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. & ROLLIN, A.L. (1993). Filter criteria for well graded cohesionless soils. Proceedings of the First International Conference «Geofilters», Germany, 97-106.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. Geotextiles and Geomembranes, vol. 17, 299-312.

LOUNGNARATH, A.-M.; LAFLEUR, J. (1996). Stabilité interne des moraines compactées utilisées dans les noyaux de barrages. Centre de Développement Technique (C.D.T) École Polytechnique de Montréal, 194 p.

ST-ARNAUD, G. (1995). The high pore pressures within embankment dams : an unsaturated soil approach. Canadian Geotechnical Journal, vol.32, no. 5, 892-898.

S.E.B.J. (1987). Le complexe hydro-électrique de la Grande Rivière – Réalisation de la première phase. Éditions de la Chenelière, 496 p.

SIERAKOWSKI, C. (1994). Internal behaviour of the LG4 dams. Rapport interne d'Hydro-Québec, Division Maintenance et Sécurité des Barrages, 16 p.

VERMA, N.S., PARE, J.J., BONCOMPAIN, B., GARNEAU, R. & RATTUE, A. (1985). Behaviour of the LG4 main dam. Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 4, San Francisco, 2049-2054.

ASTM (1996). Standard Practice for Dry Preparation of Soils Samples for Particles-Size Analysis and Determination of Soil Constants (D 421-85). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-08, ASTM, 8-9.

ASTM (1996). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (D 422-63). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-08, ASTM, 10-16.

ASTM (1996). Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer Than the n°200 Sieve (D 1140-92). Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-08, ASTM, 90-92.

ASTM (1996). **Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table (D 4253-93).** Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-08, ASTM, 533-551.

ASTM_ (1996). **Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table (D 4254-91).** Annual Book of ASTM Standards, vol. 04-08, ASTM, 552-559.

ANNEXE A

Résultats du petit filtramètre

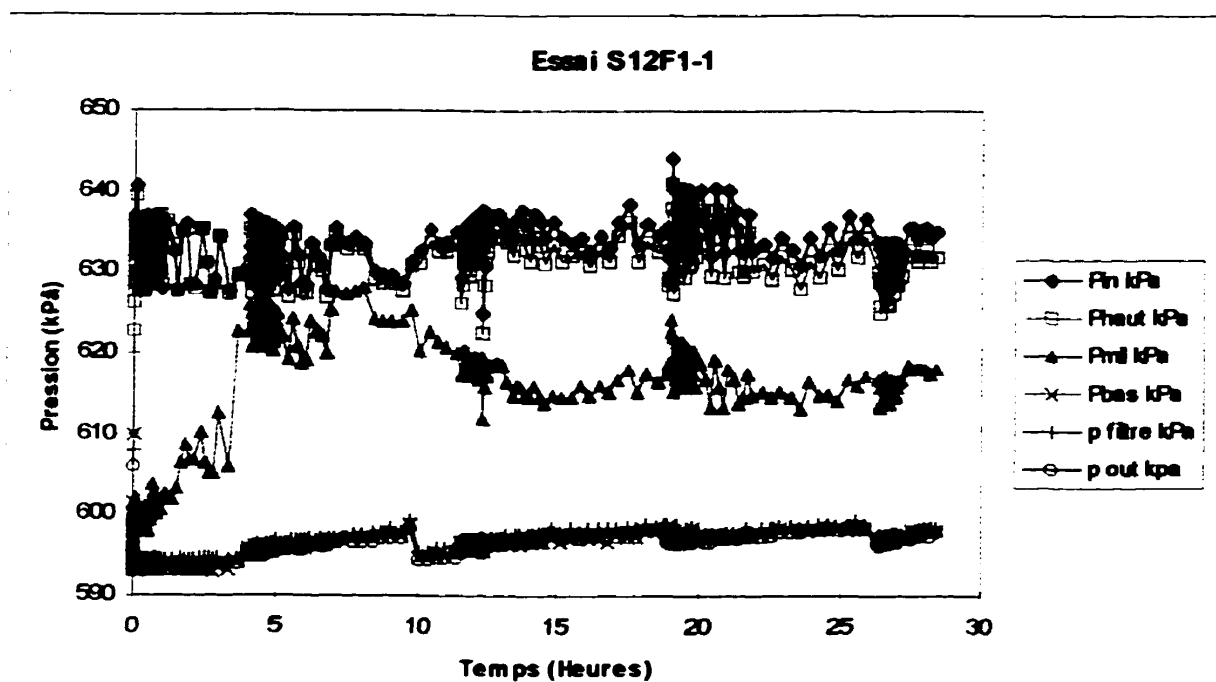


Figure A-1 : Variation des pressions lors de l'essai S12F1-1

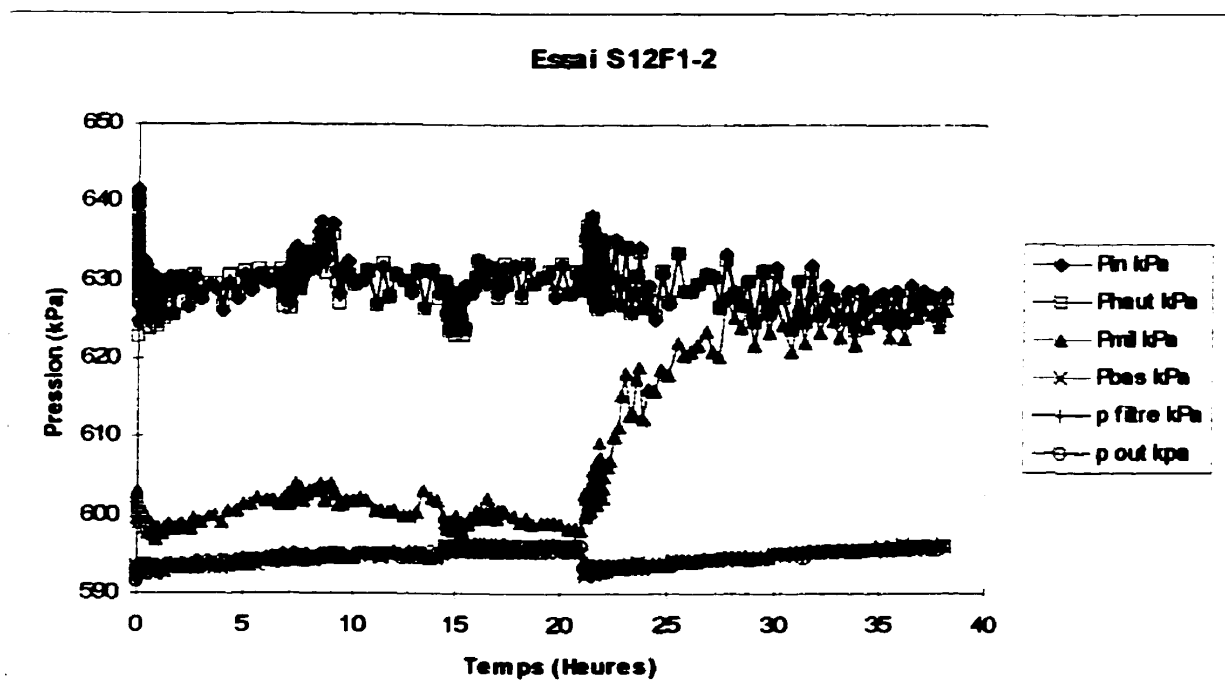


Figure A-2 : Variation des pressions lors de l'essai S12F1-2

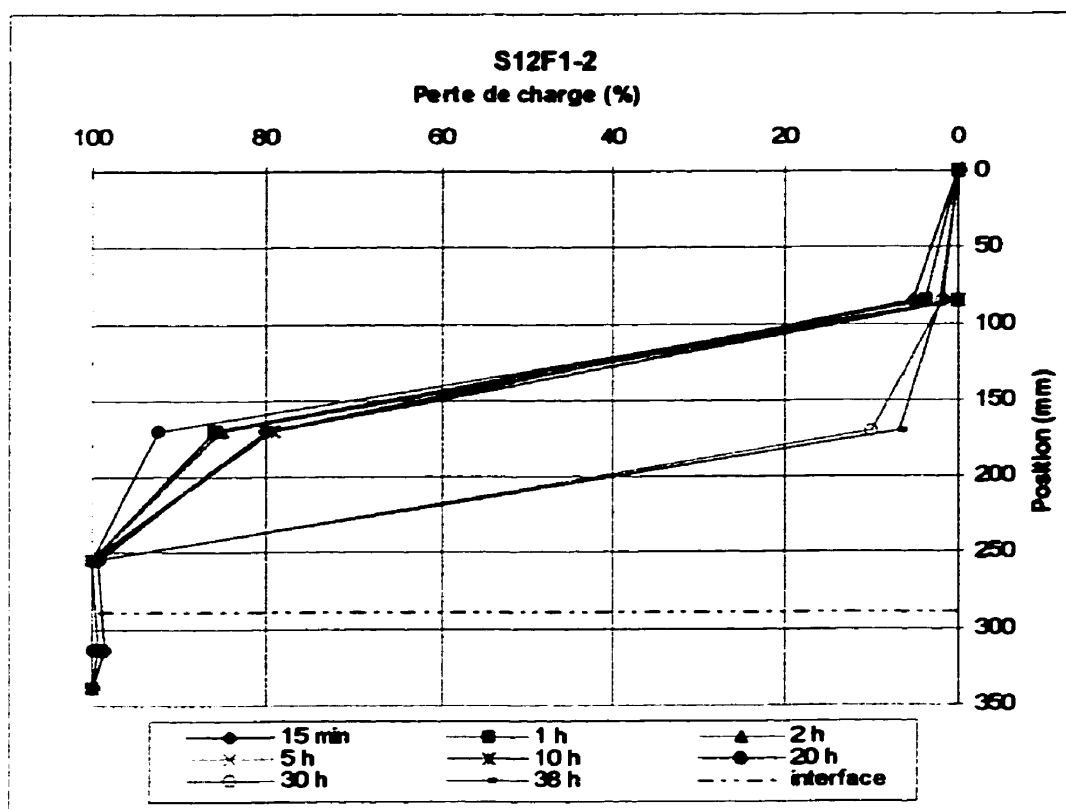


Figure A-3 : Distribution des pertes de charge lors de l'essai S12F1-2

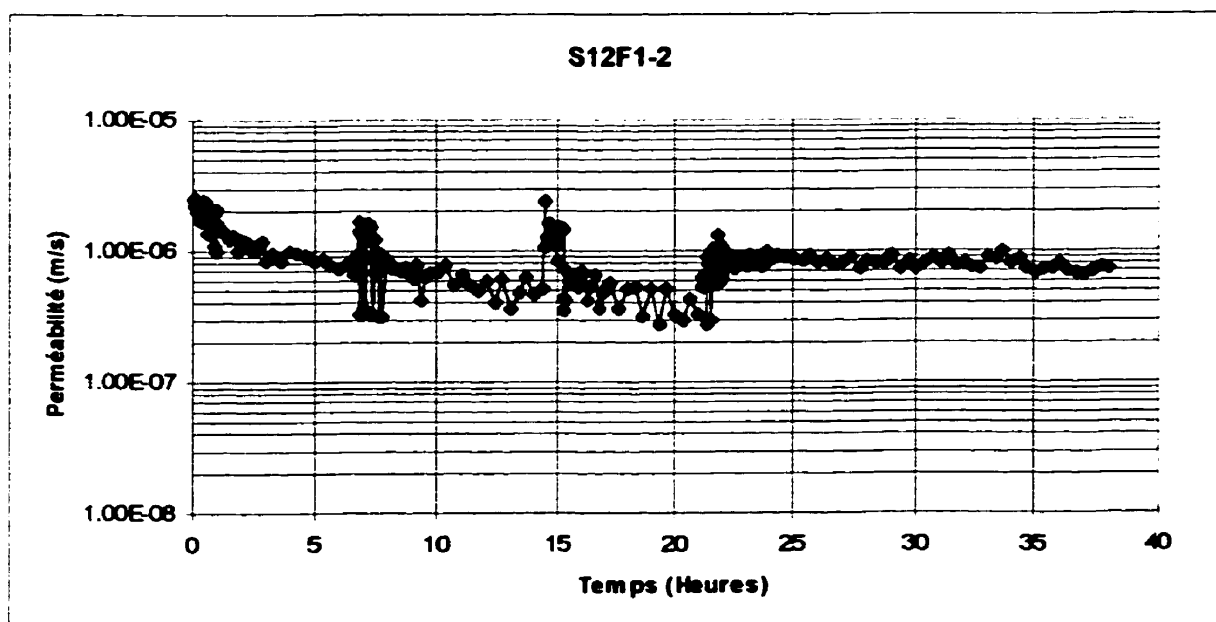


Figure A-4 : Variation de la perméabilité lors de l'essai S12F1-2

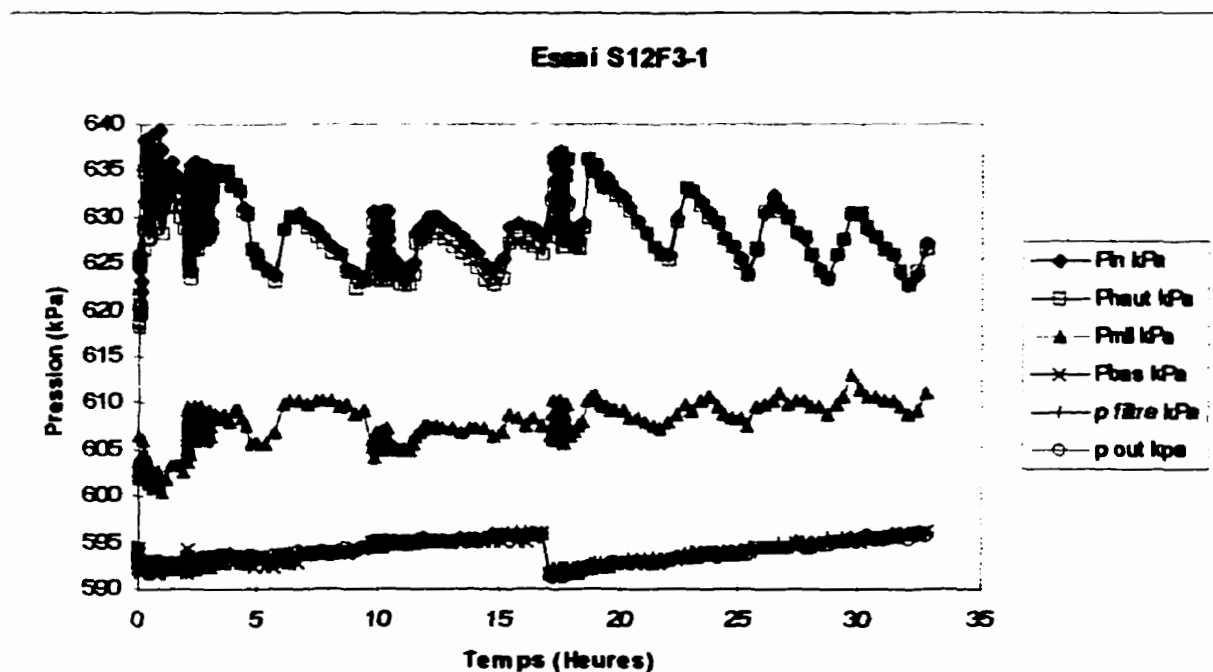


Figure A-5 : Variation des pressions lors de l'essai S12F3-1

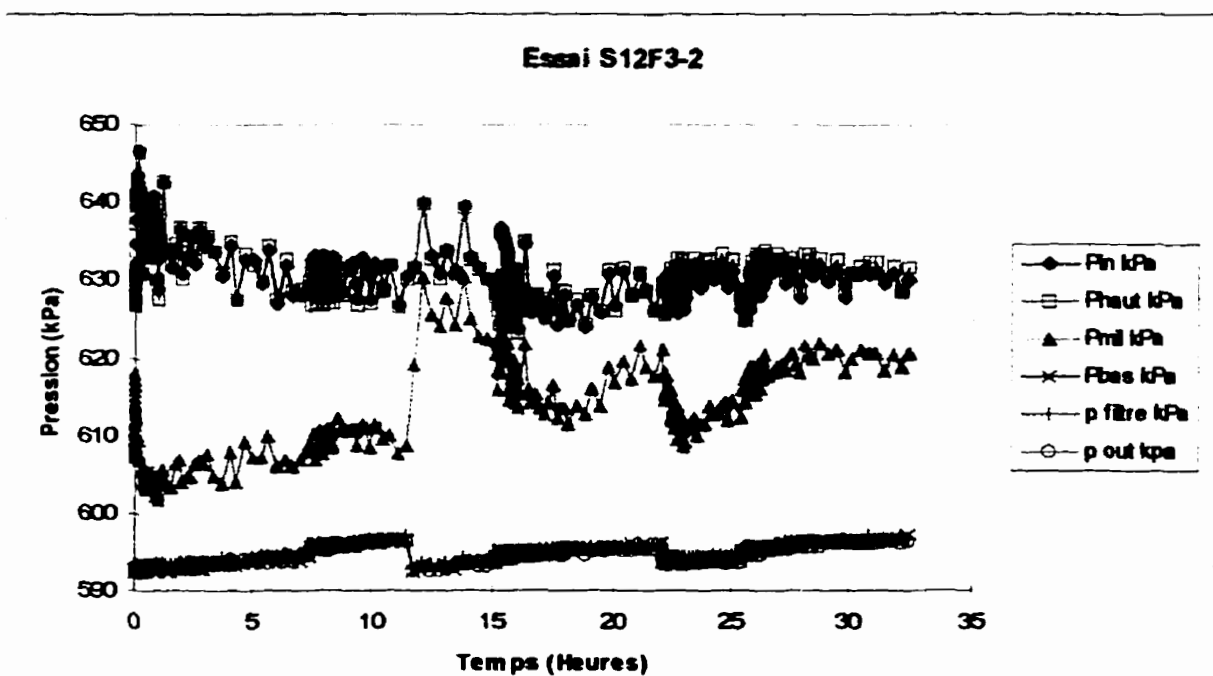


Figure A-6 : Variation des pressions lors de l'essai S12F3-2

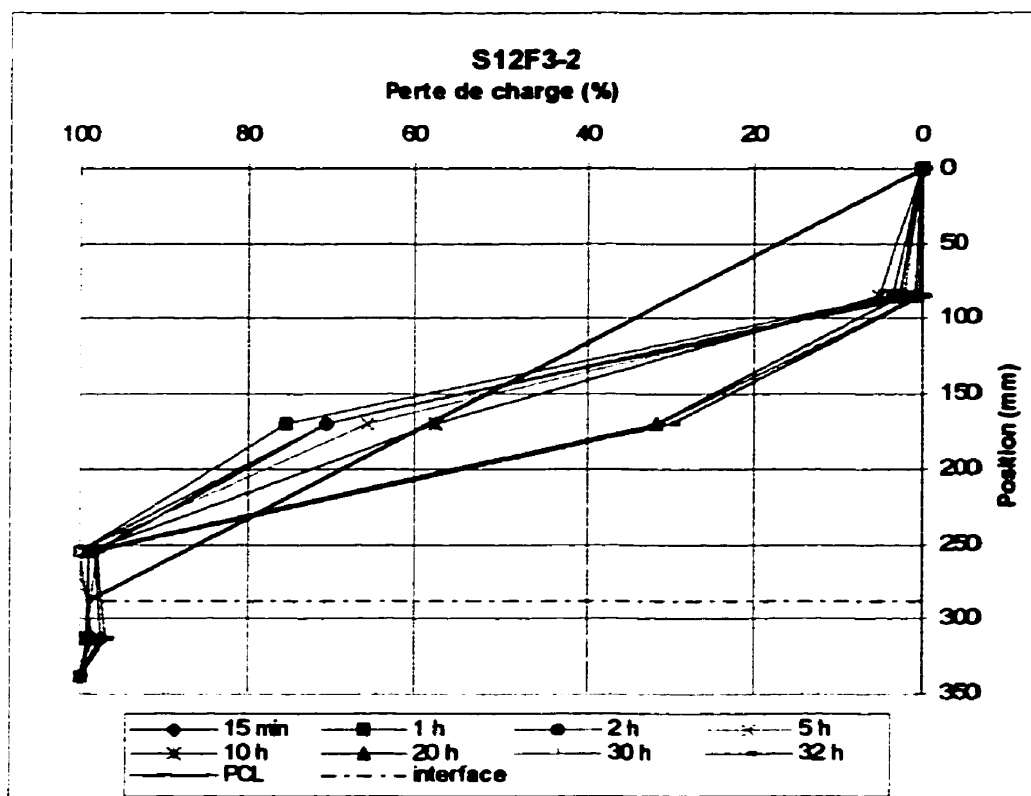


Figure A-7 : Distribution des pertes de charge lors de l'essai S12F3-2

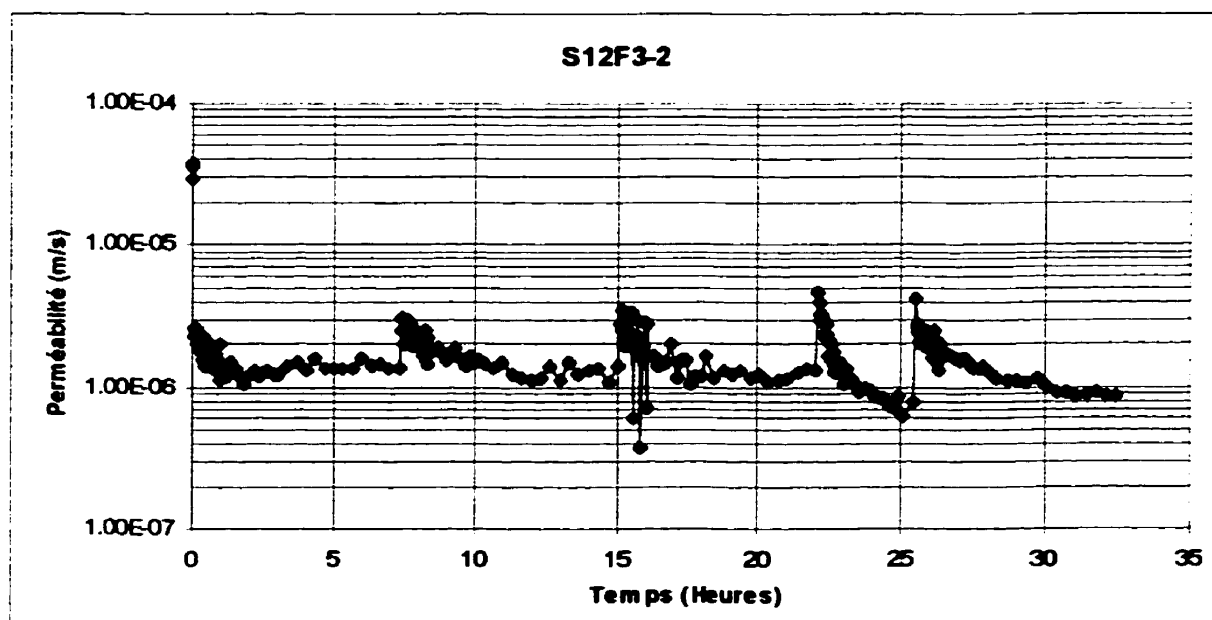


Figure A-8 : Variation de la perméabilité lors de l'essai S12F3-2

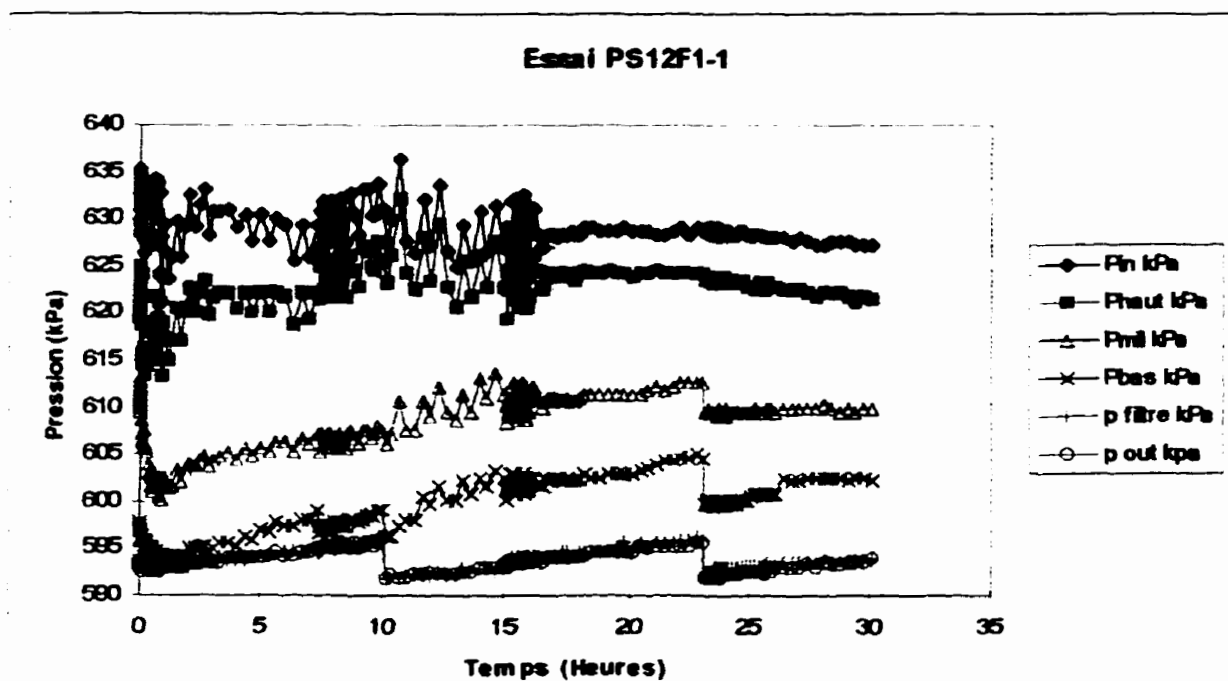


Figure A-9 : Variation des pressions lors de l'essai PS12F1-1

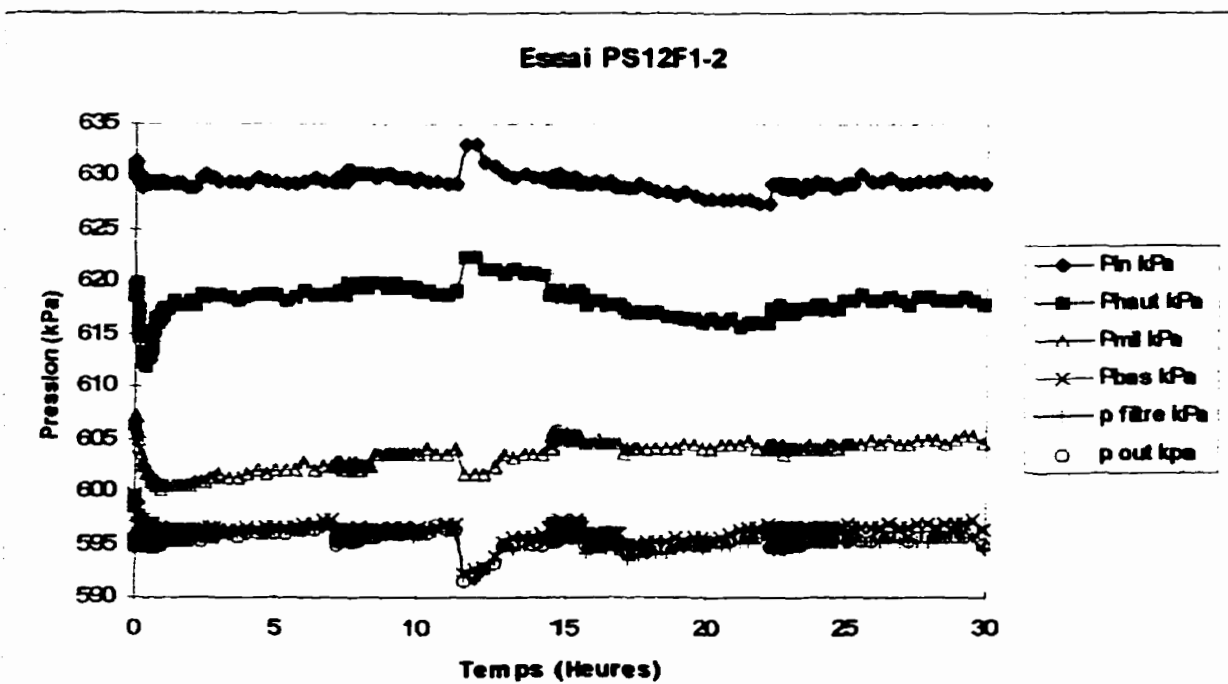


Figure A-10 : Variation des pressions lors de l'essai PS12F1-2

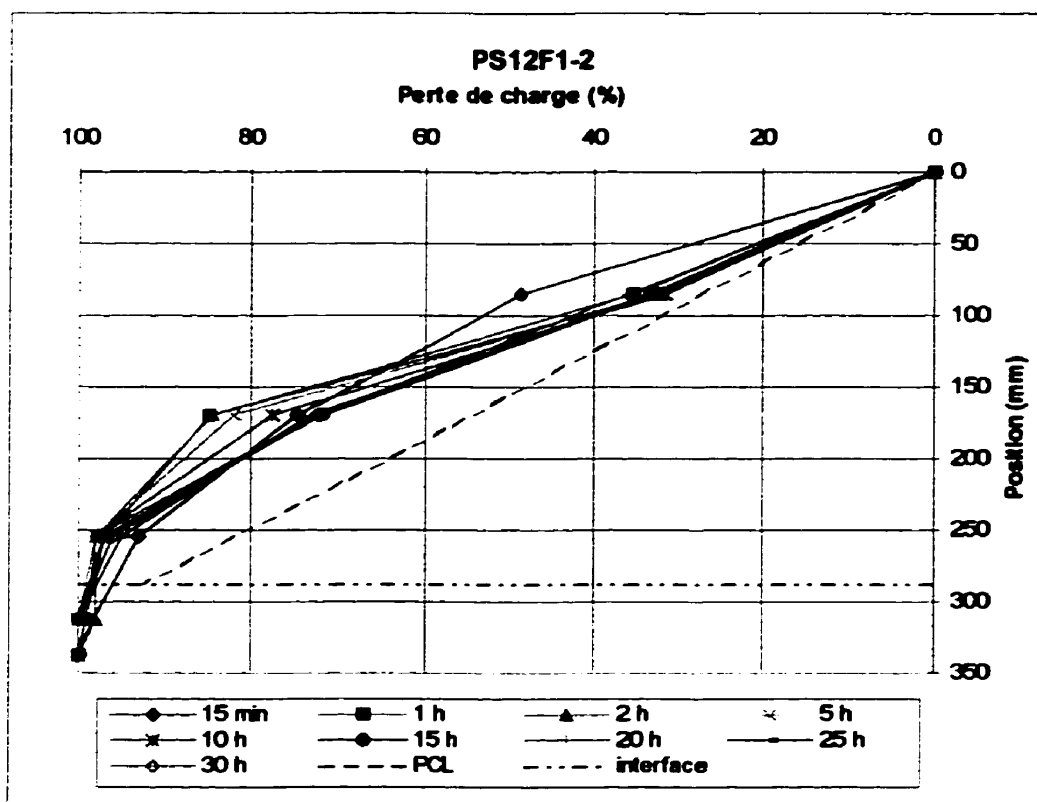


Figure A-11 : Distribution des pertes de charge lors de l'essai PS12F1-2

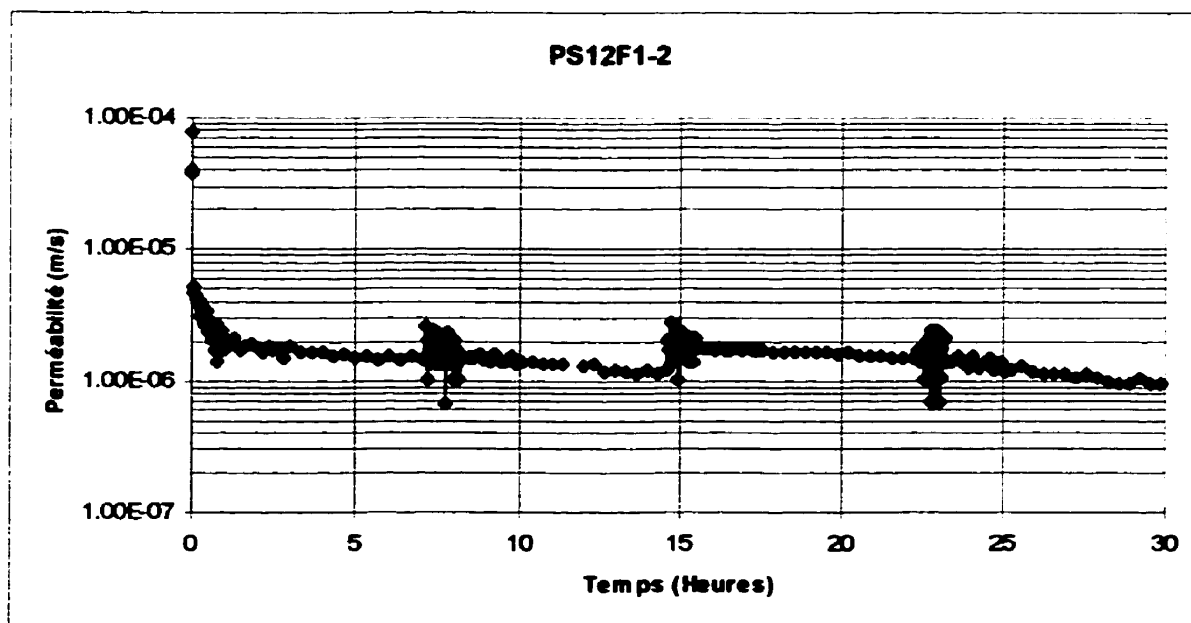


Figure A-12 : Variation de la perméabilité lors de l'essai PS12F1-2

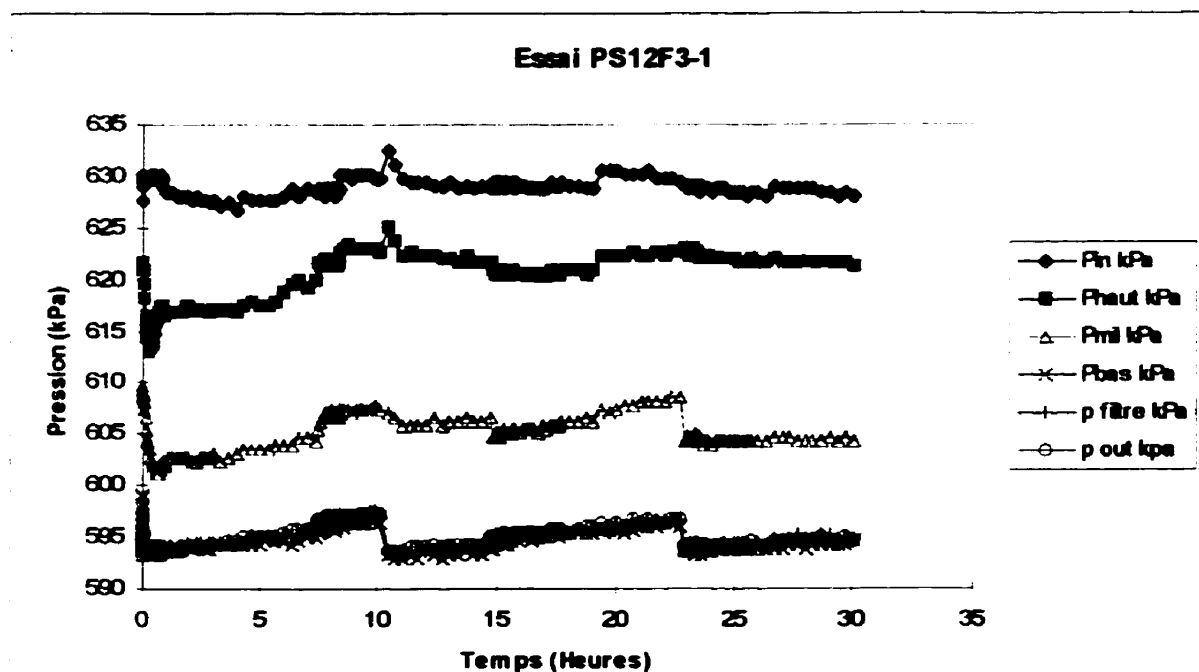


Figure A-13 : Variation des pressions lors de l'essai PS12F3-1

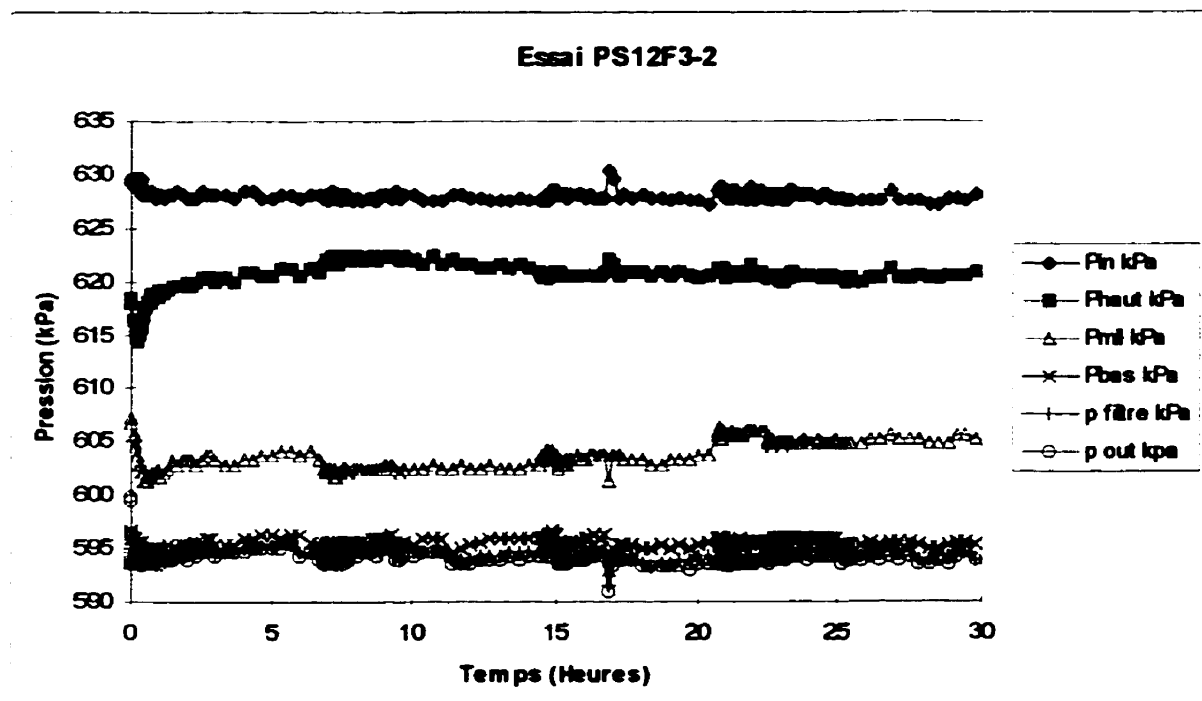


Figure A-14 : Variation des pressions lors de l'essai PS12F3-2

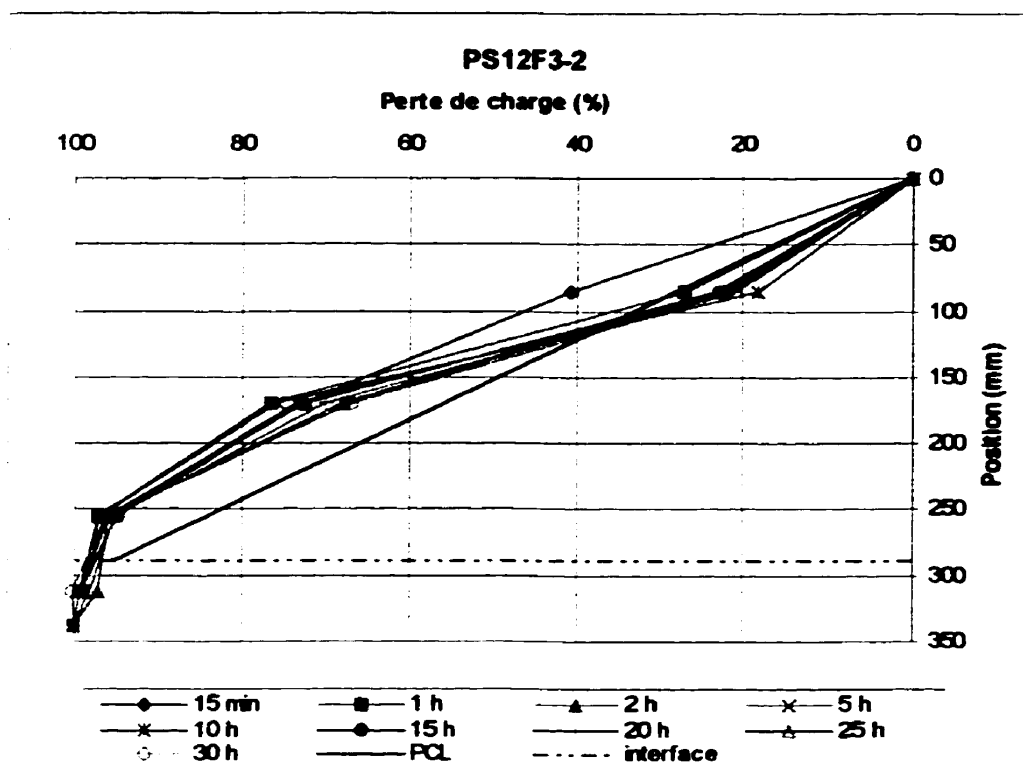


Figure A-15 : Distribution des pertes de charge lors de l'essai PS12F3-2

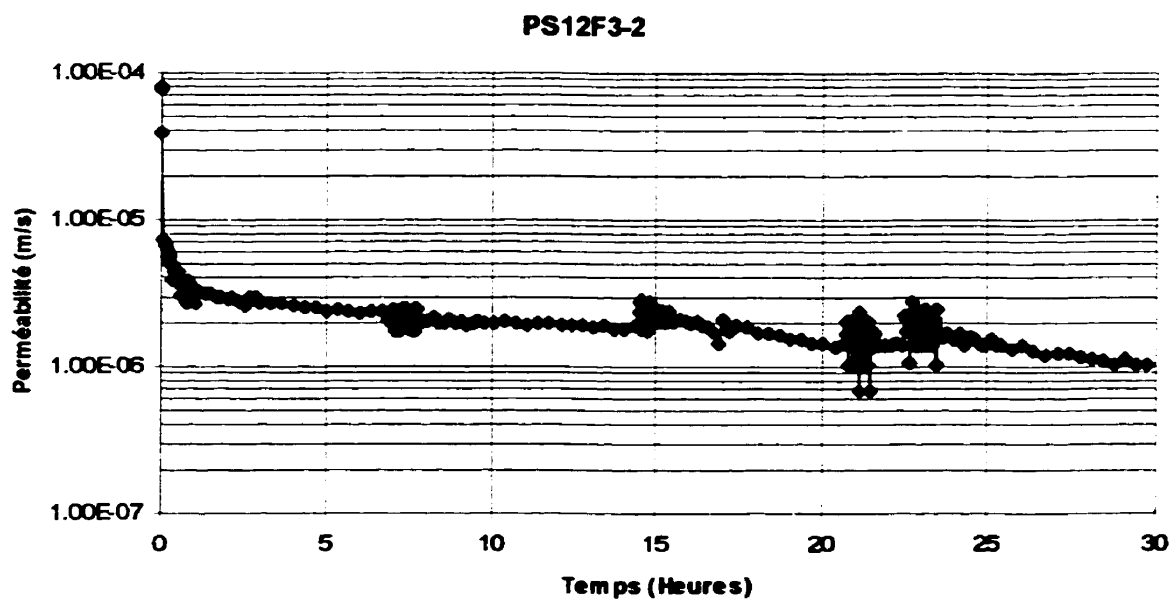


Figure A-16 : Variation de la perméabilité lors de l'essai PS12F3-2

ANNEXE B

**Résultats de l'essai no. 1
avec le filtramètre horizontal**

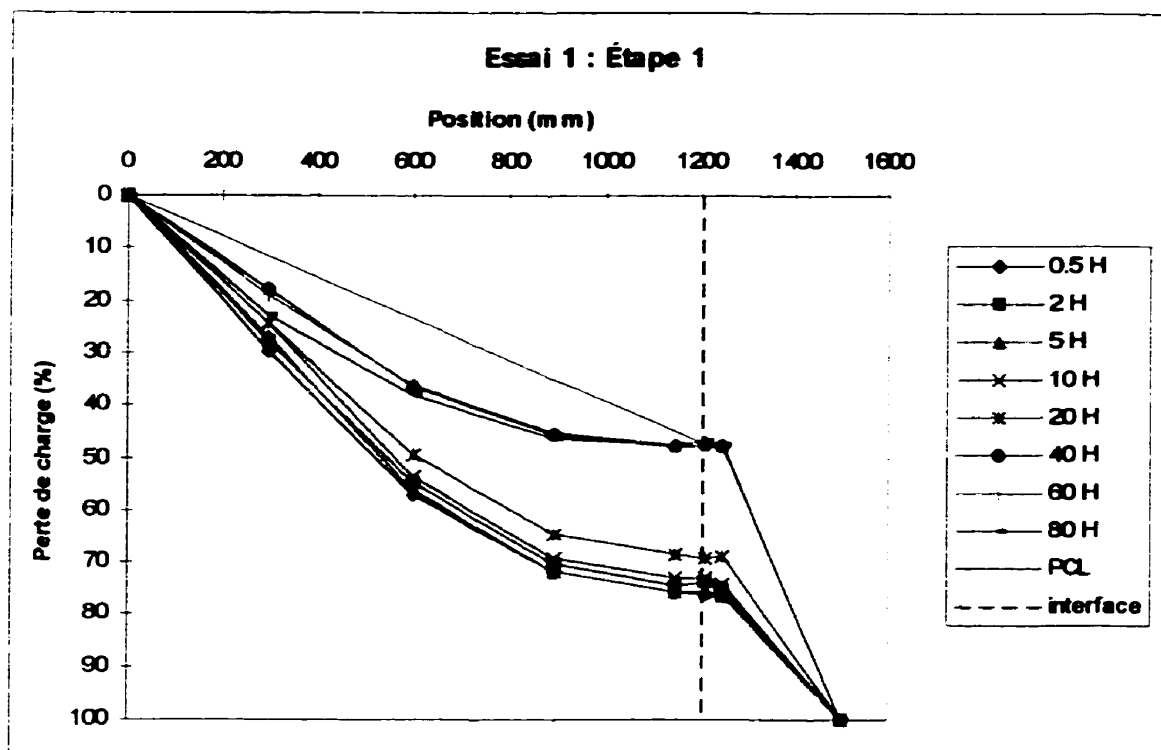


Figure B-1 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 1

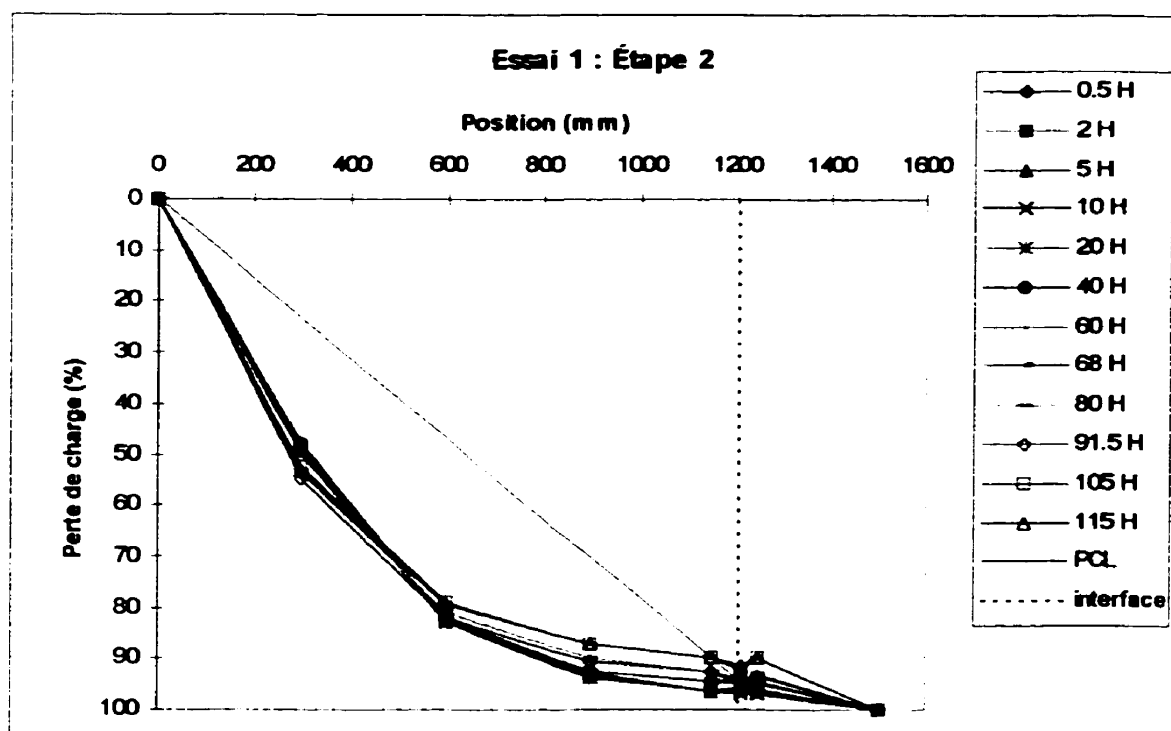


Figure B-2 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 2

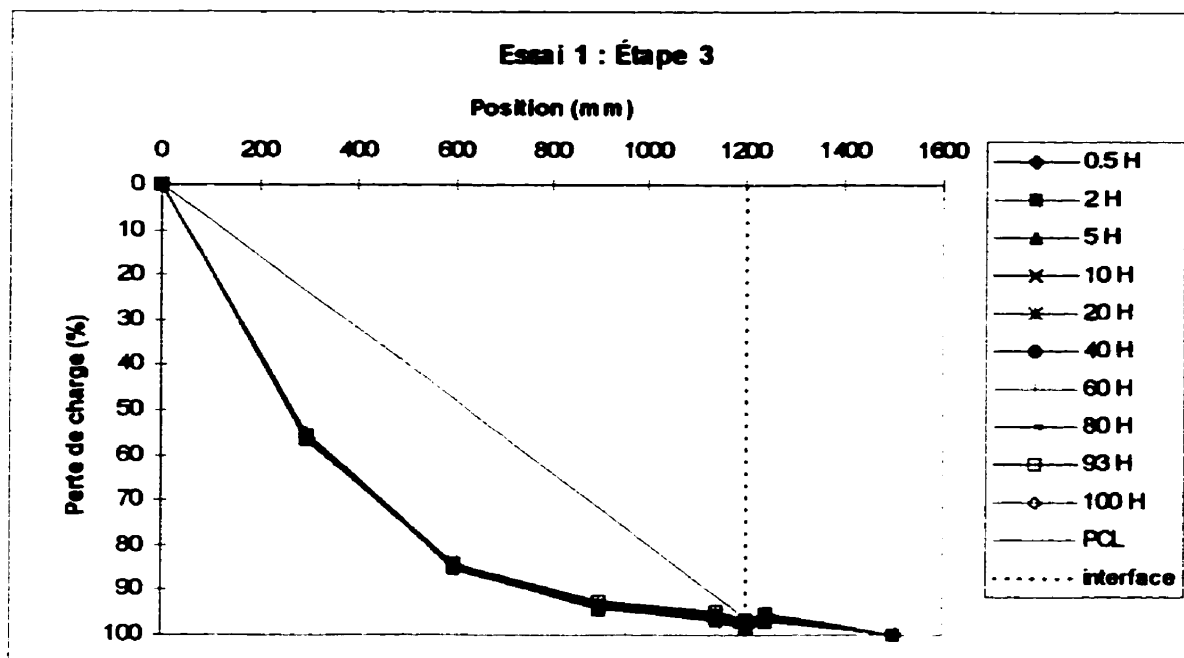


Figure B-3 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 3

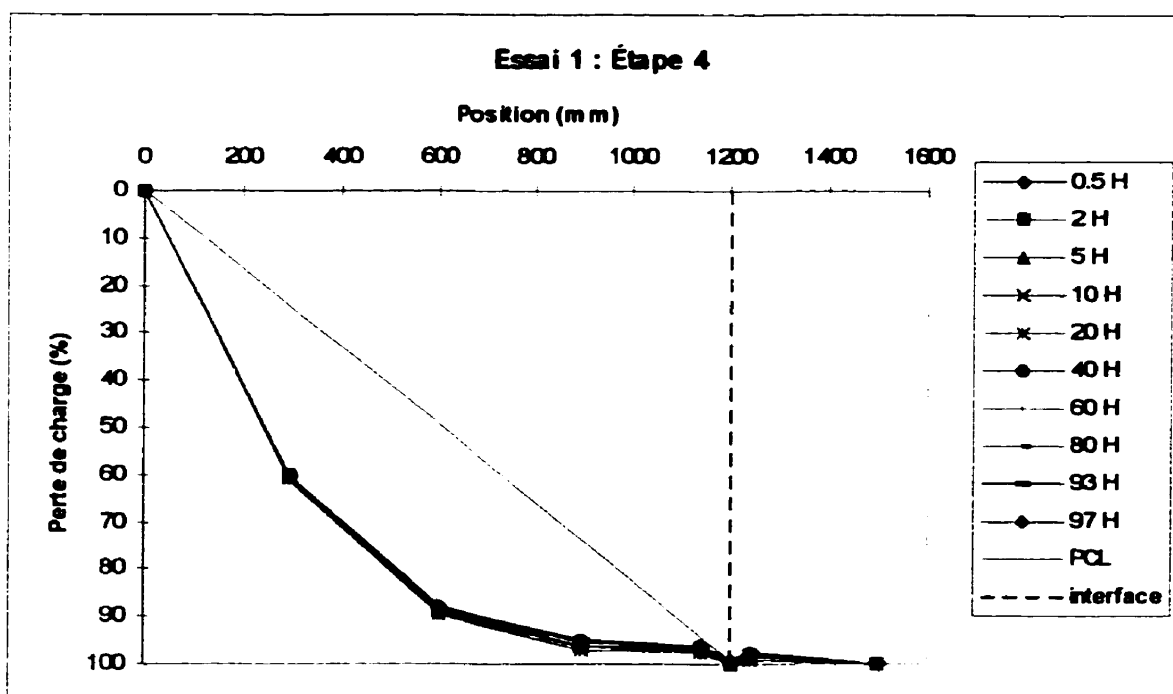


Figure B-4 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 4

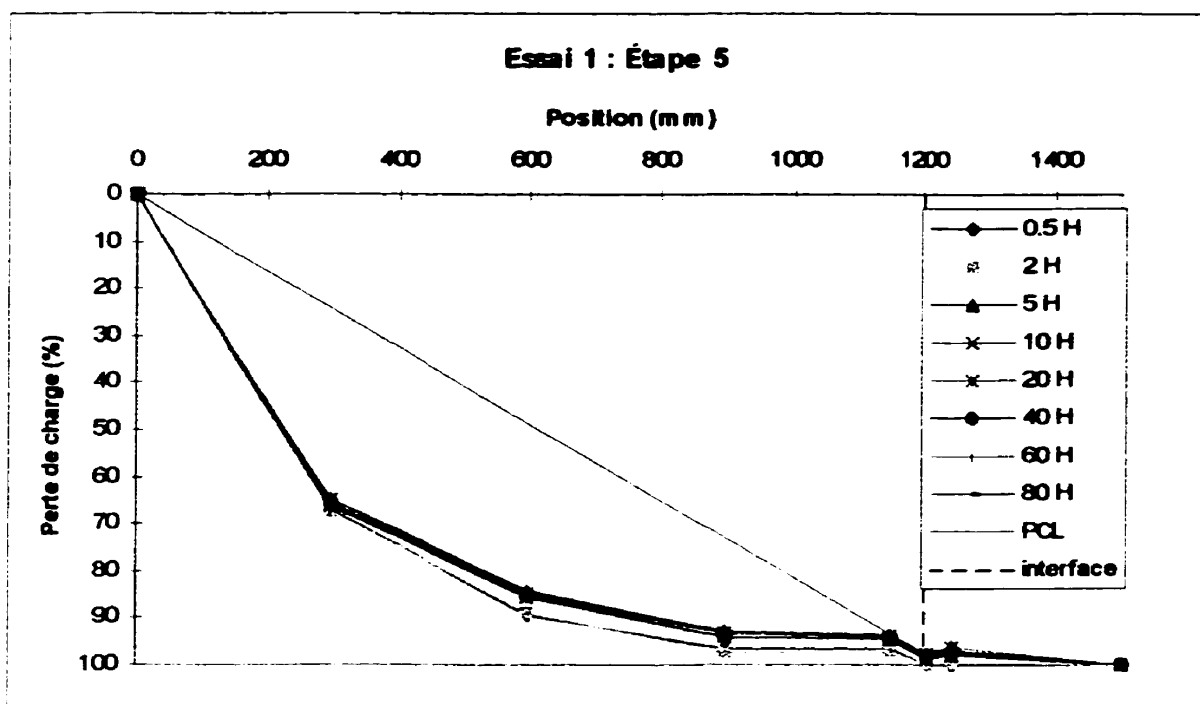


Figure B-5 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 5

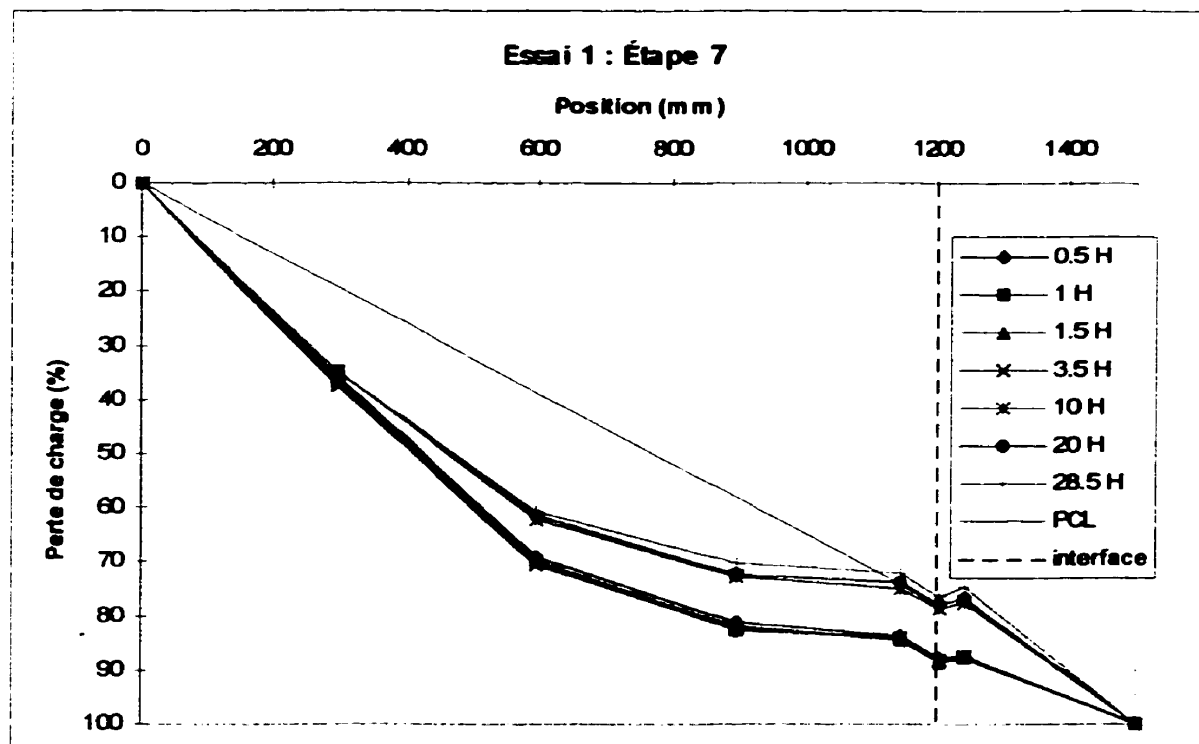


Figure B-6 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 7

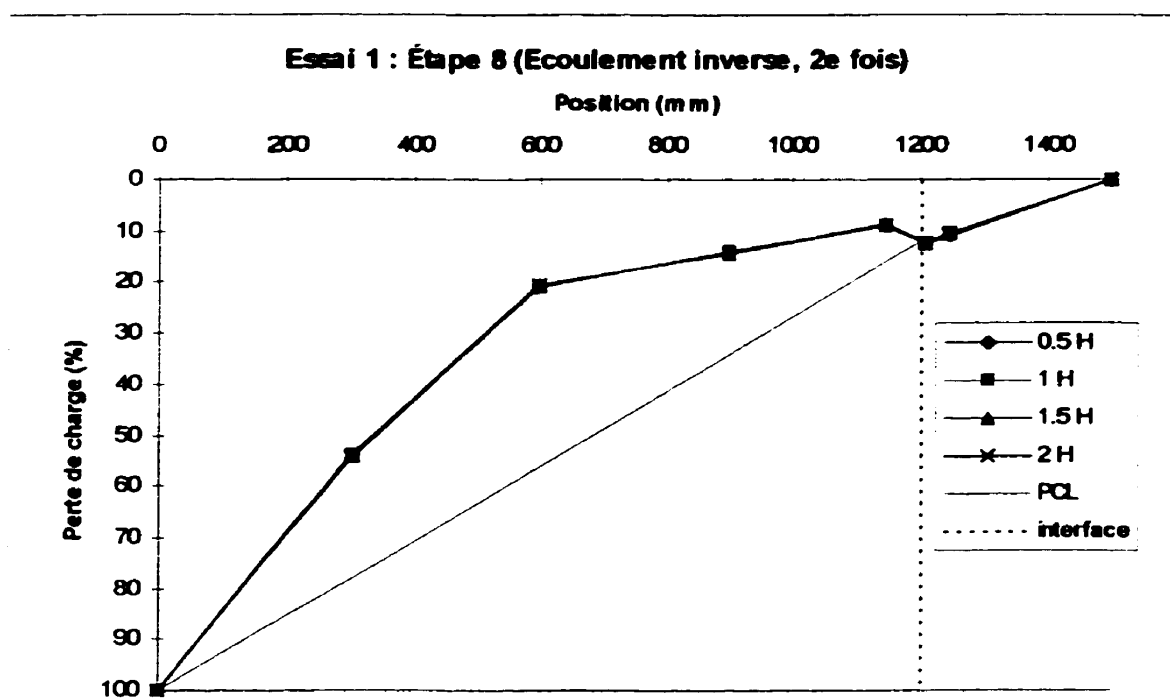


Figure B-7 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 8

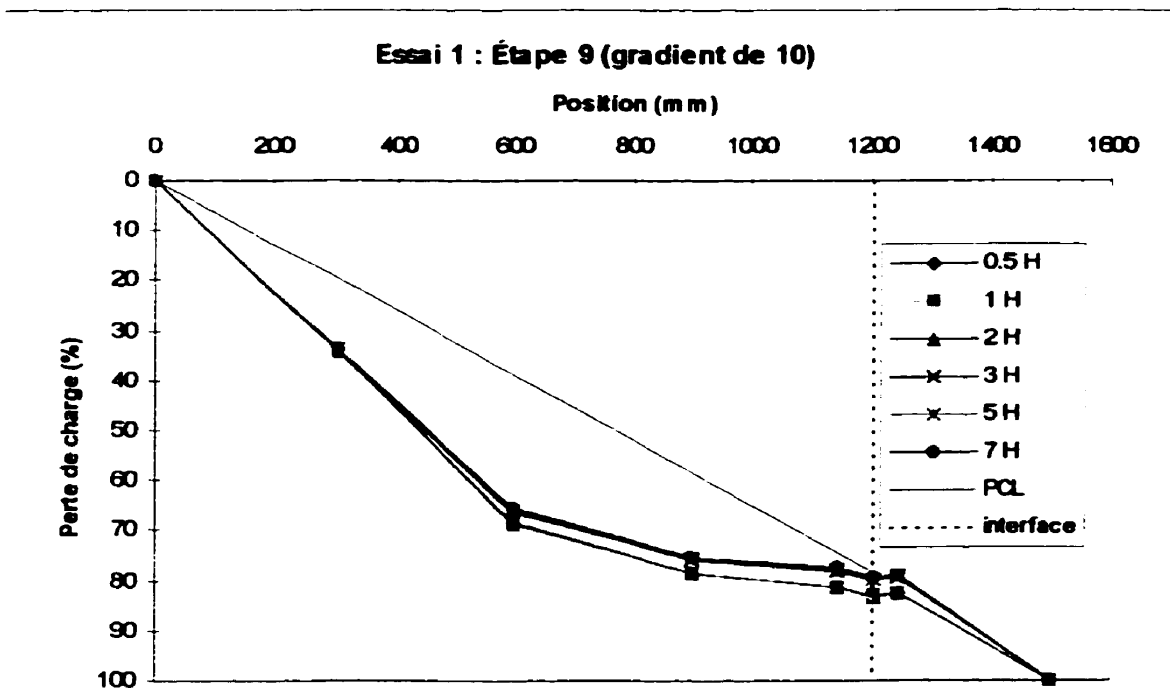


Figure B-8 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 9

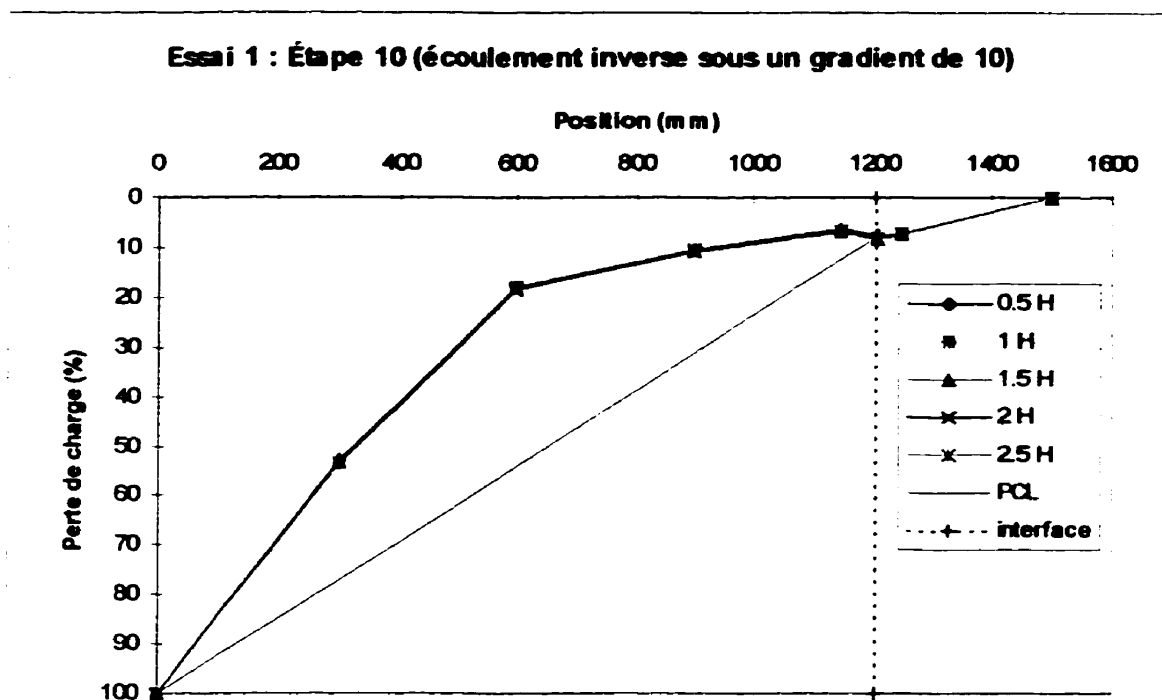


Figure B-9 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 10

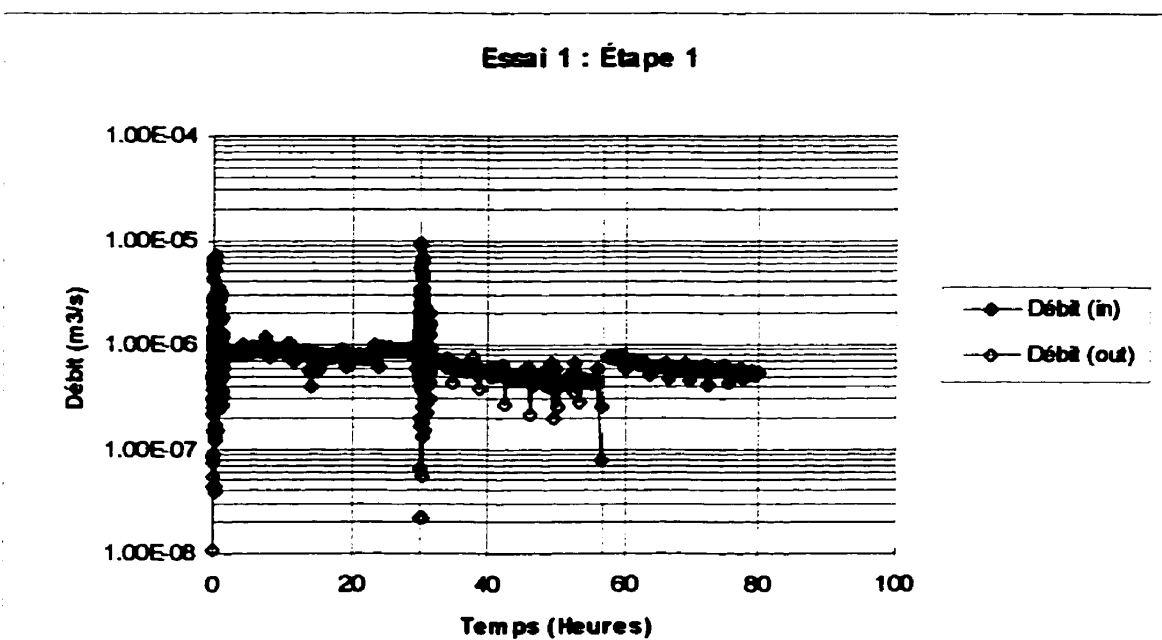


Figure B-10 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 1

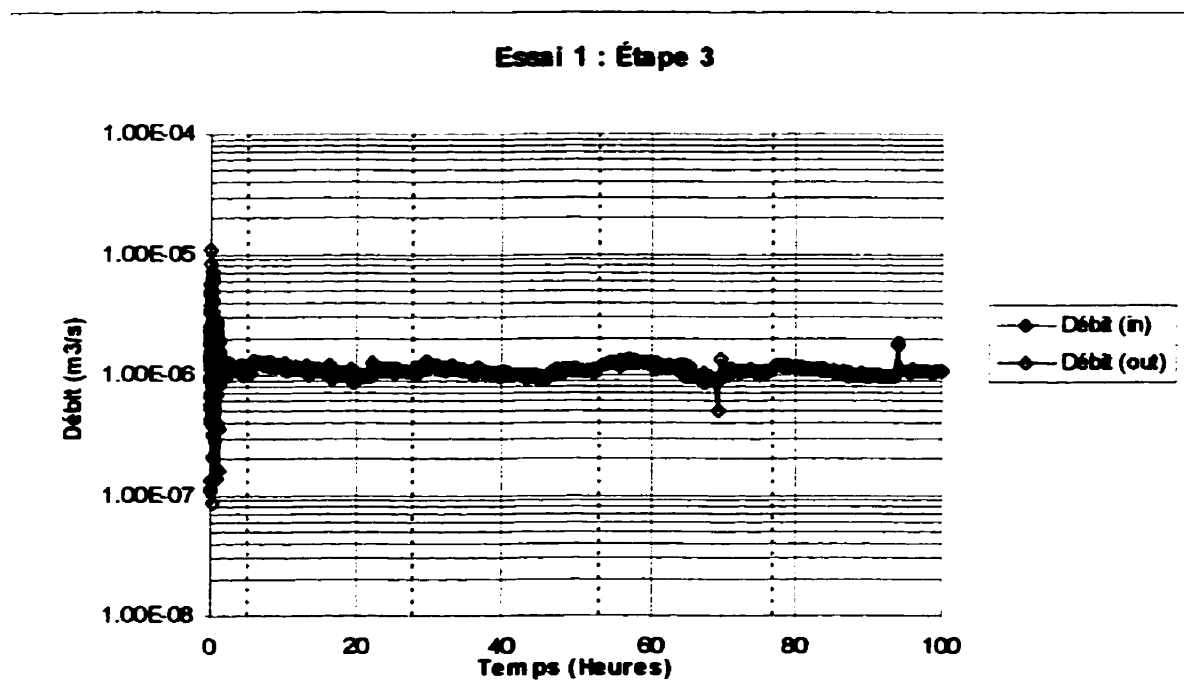


Figure B-11 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 3

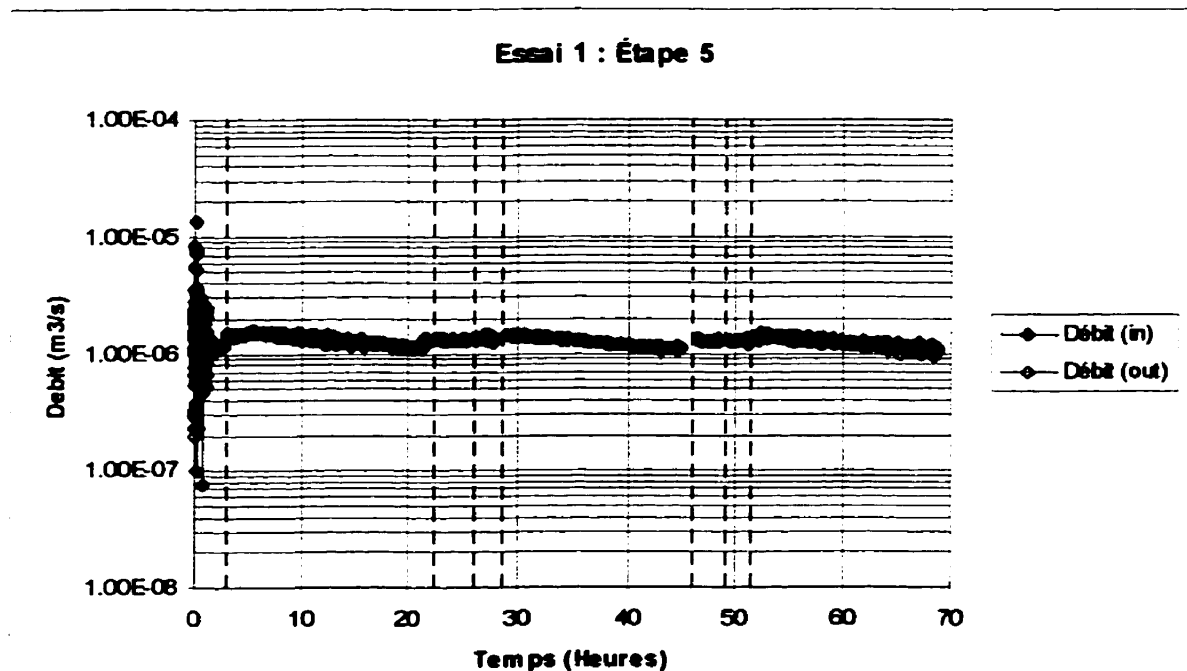


Figure B-12 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 5

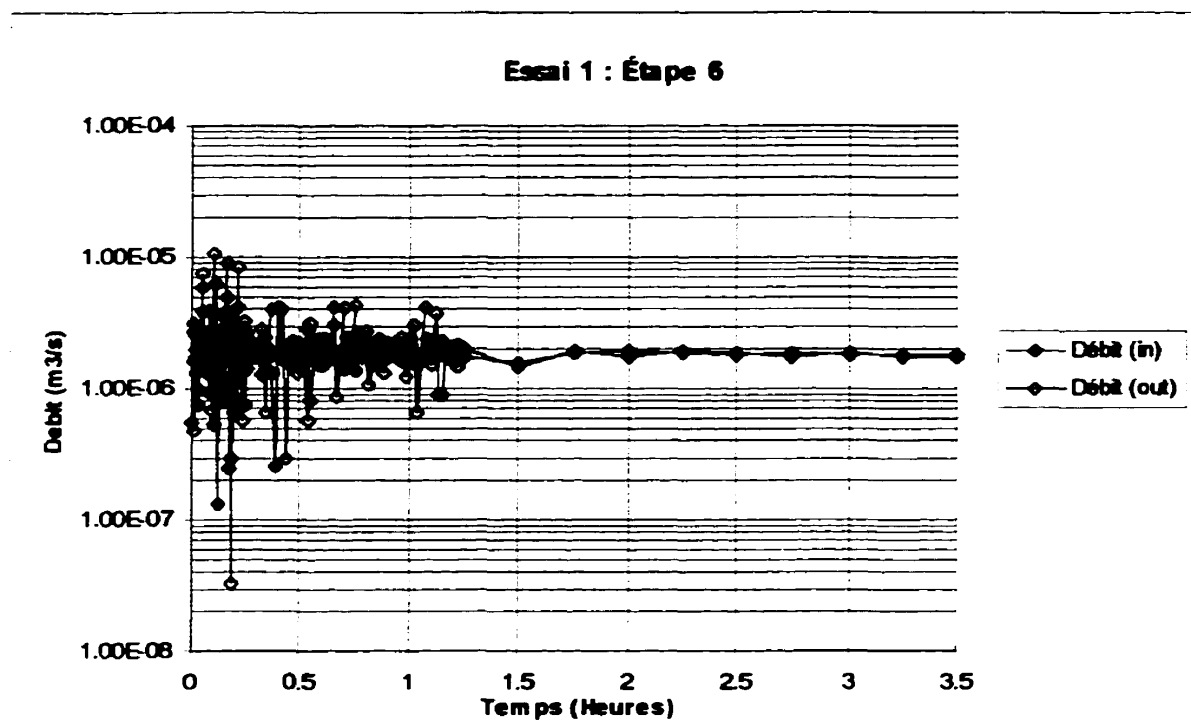


Figure B-13 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 6

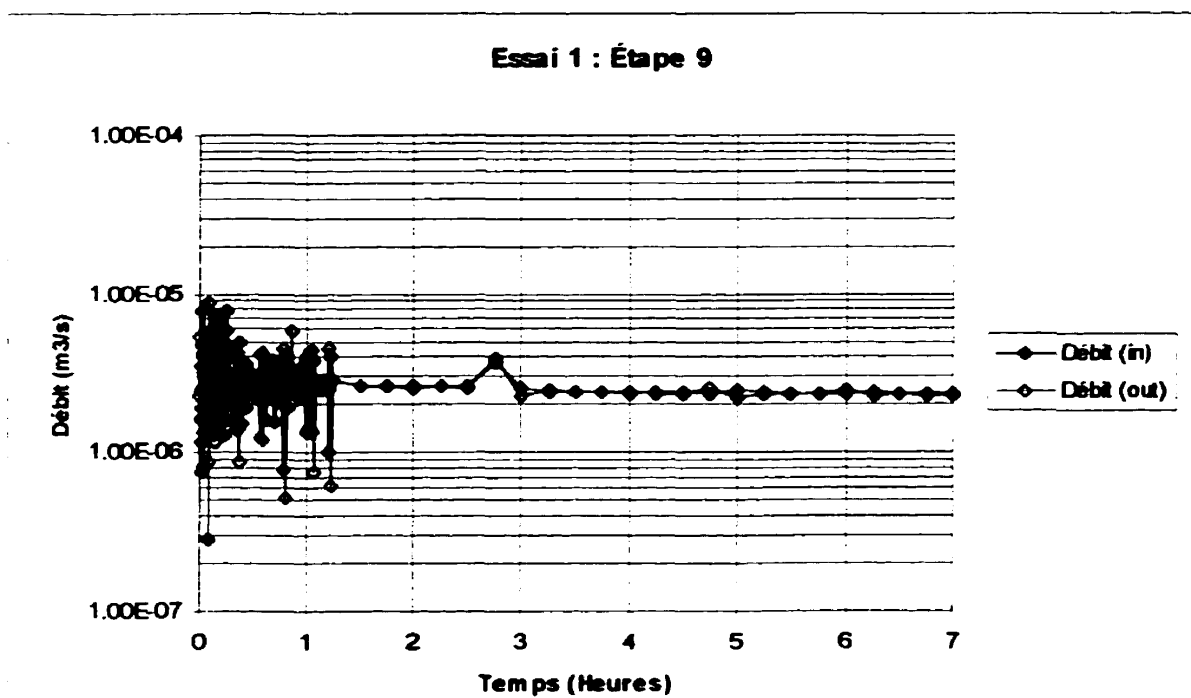


Figure B-14 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 9

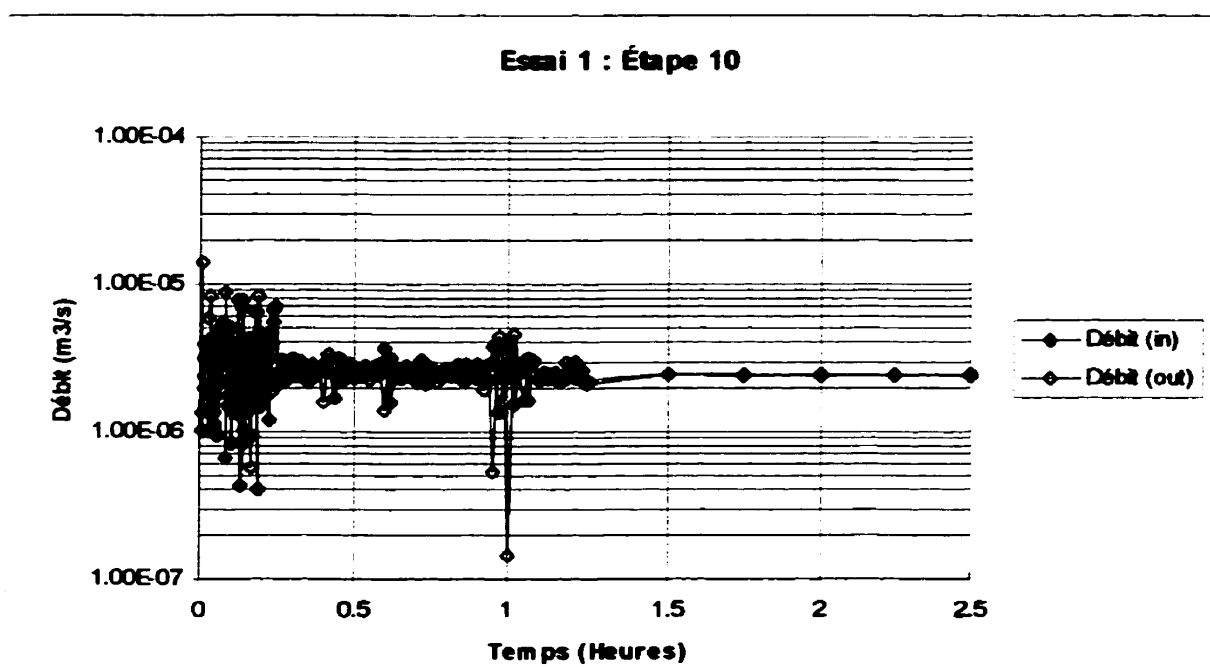


Figure B-15 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 10

ANNEXE C

**Résultats de l'essai no. 2
avec le filtramètre horizontal**

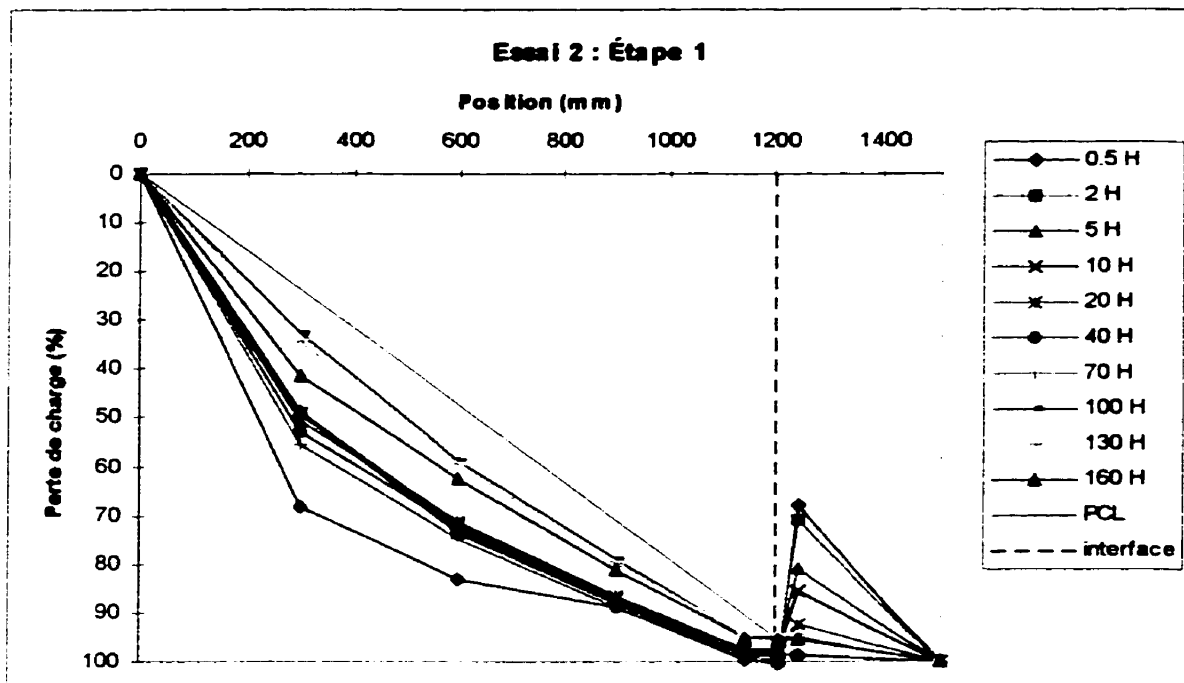


Figure C-1 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 1

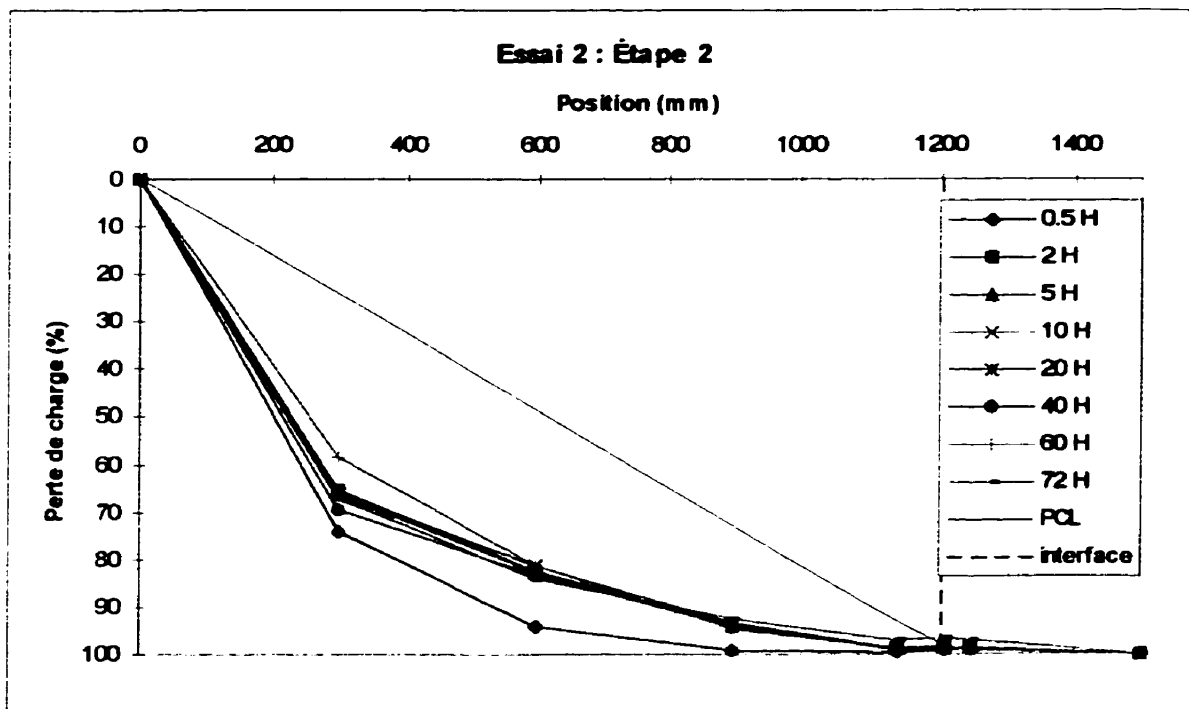


Figure C-2 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 2

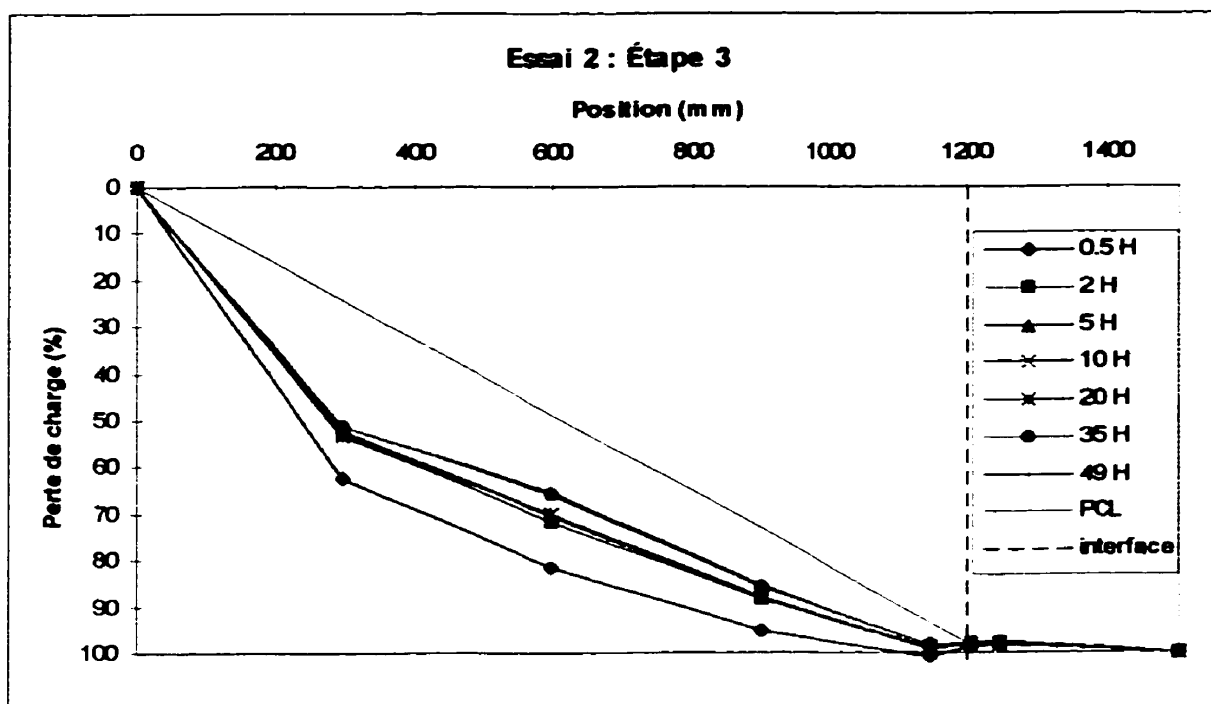


Figure C-3 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 3

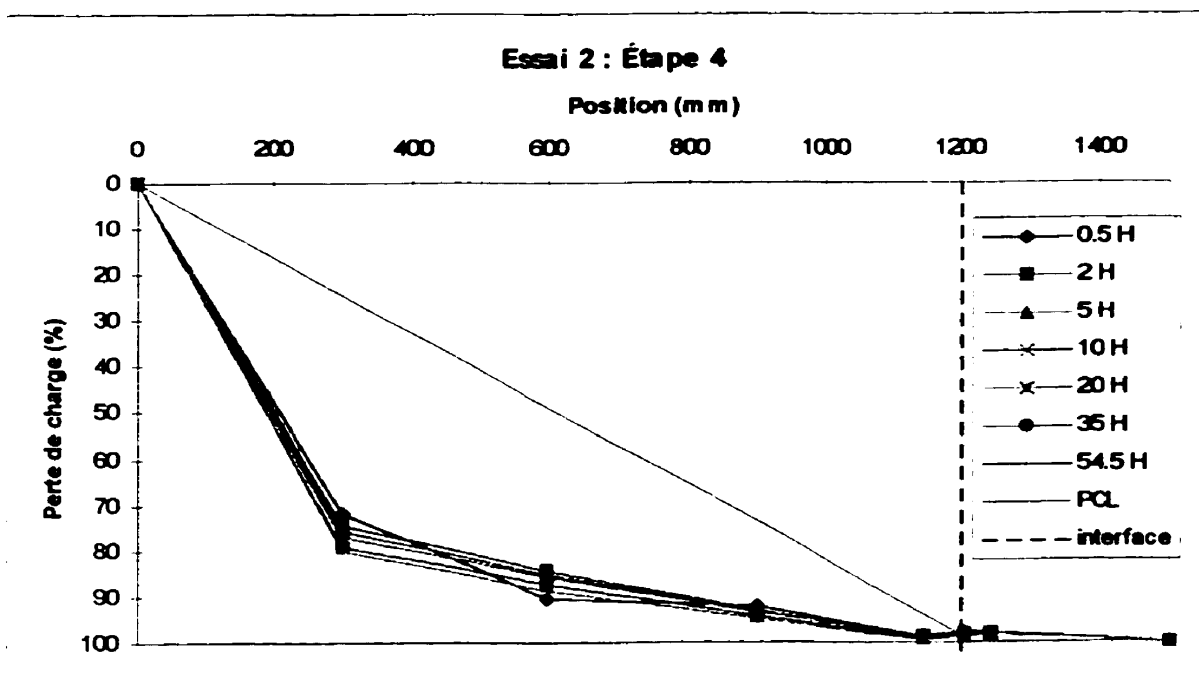


Figure C-4 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 4

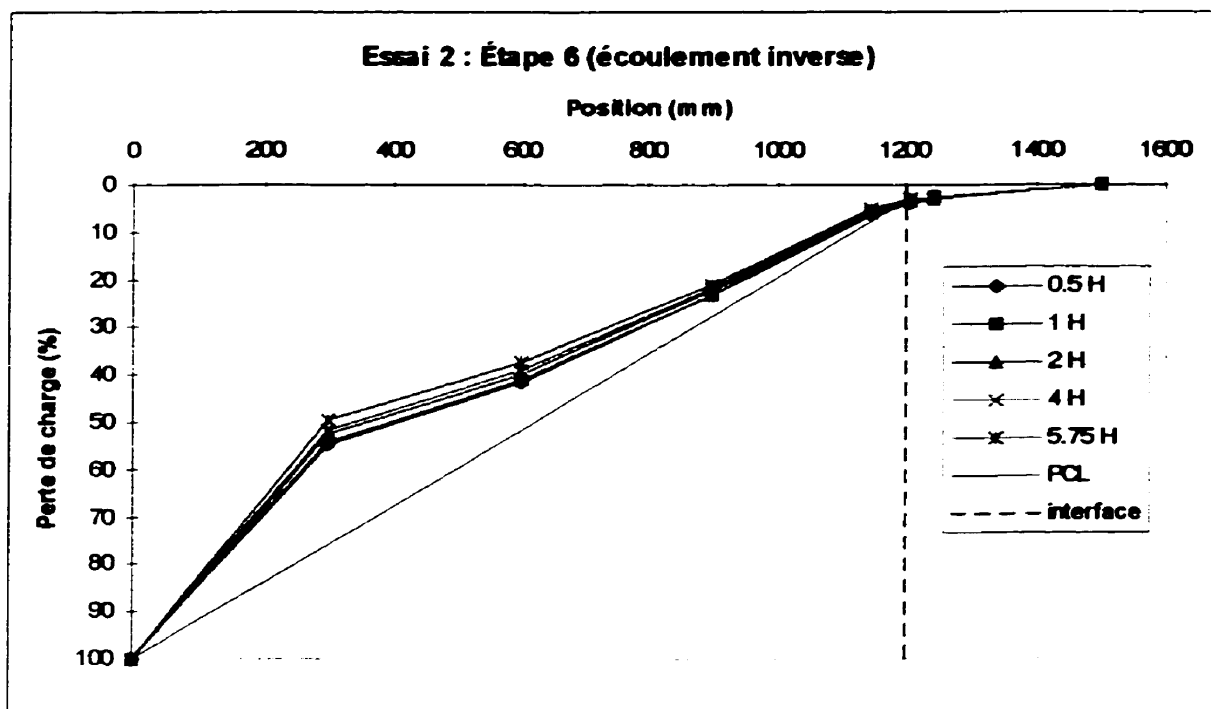


Figure C-5 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 6

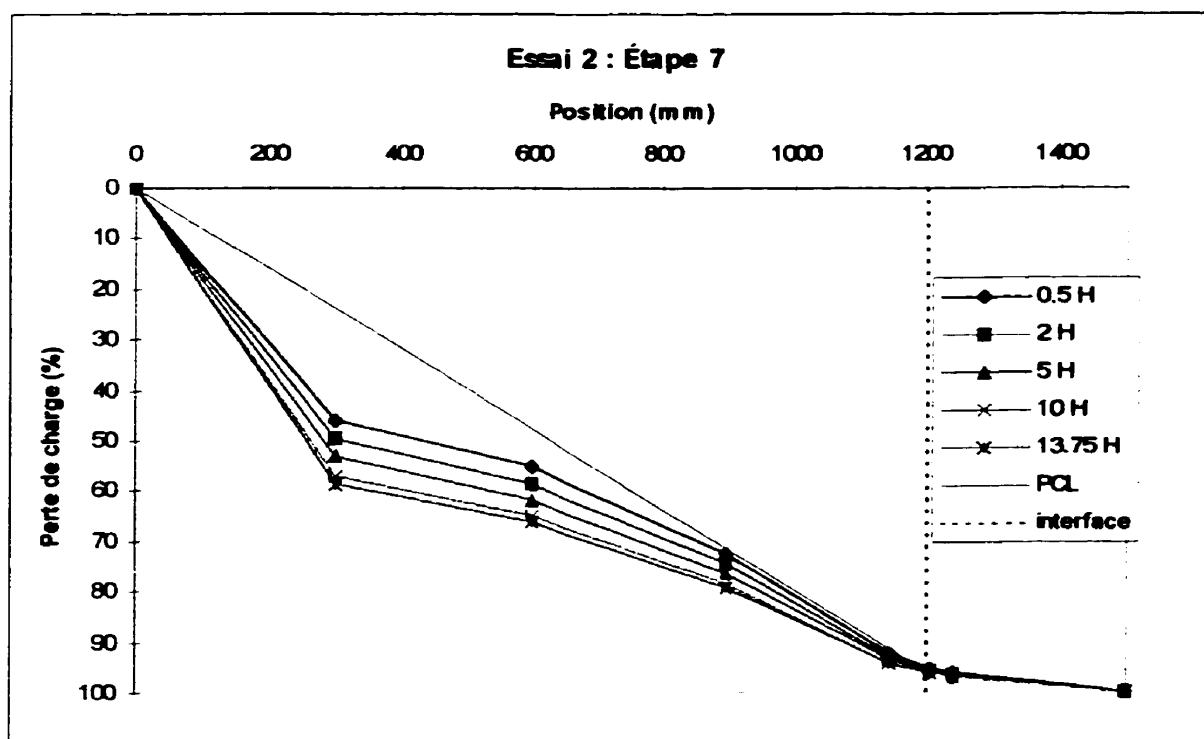


Figure C-6 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 7

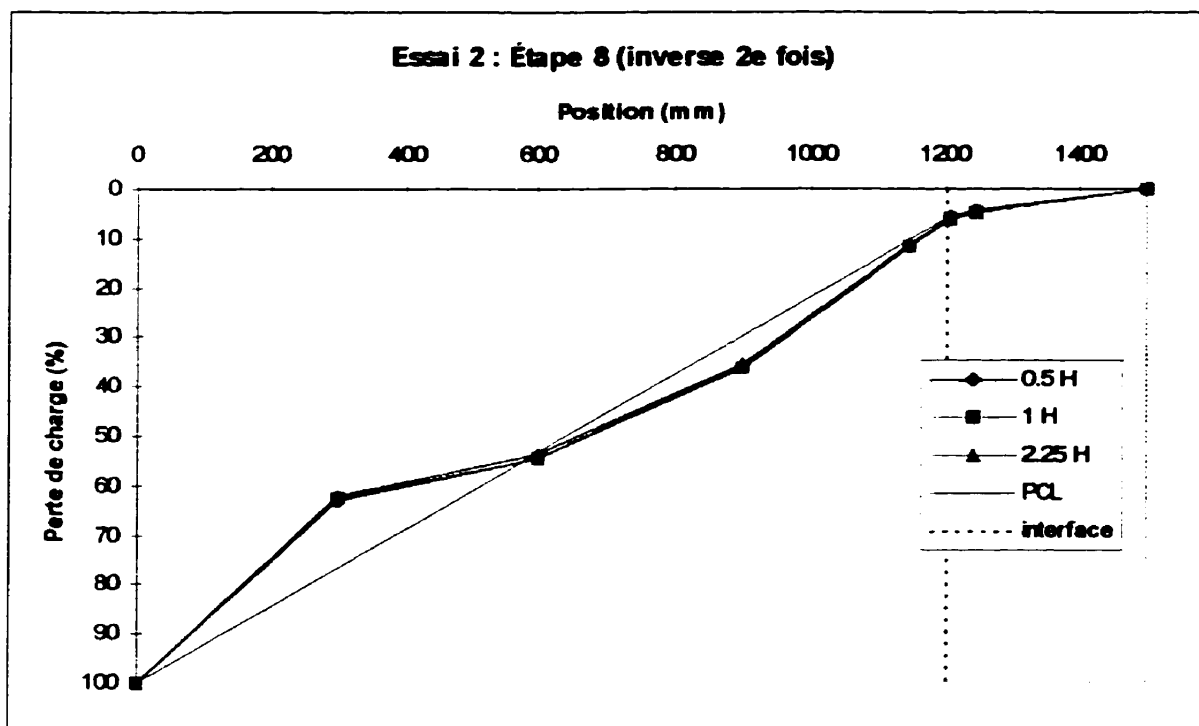


Figure C-7 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 8

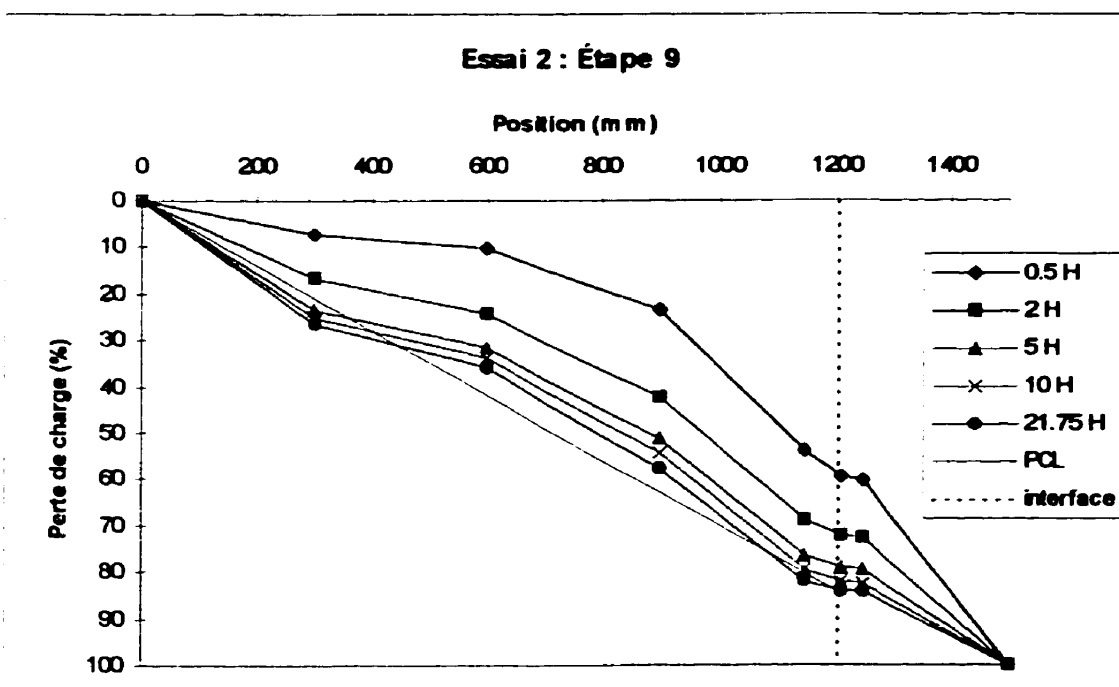


Figure C-8 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 9

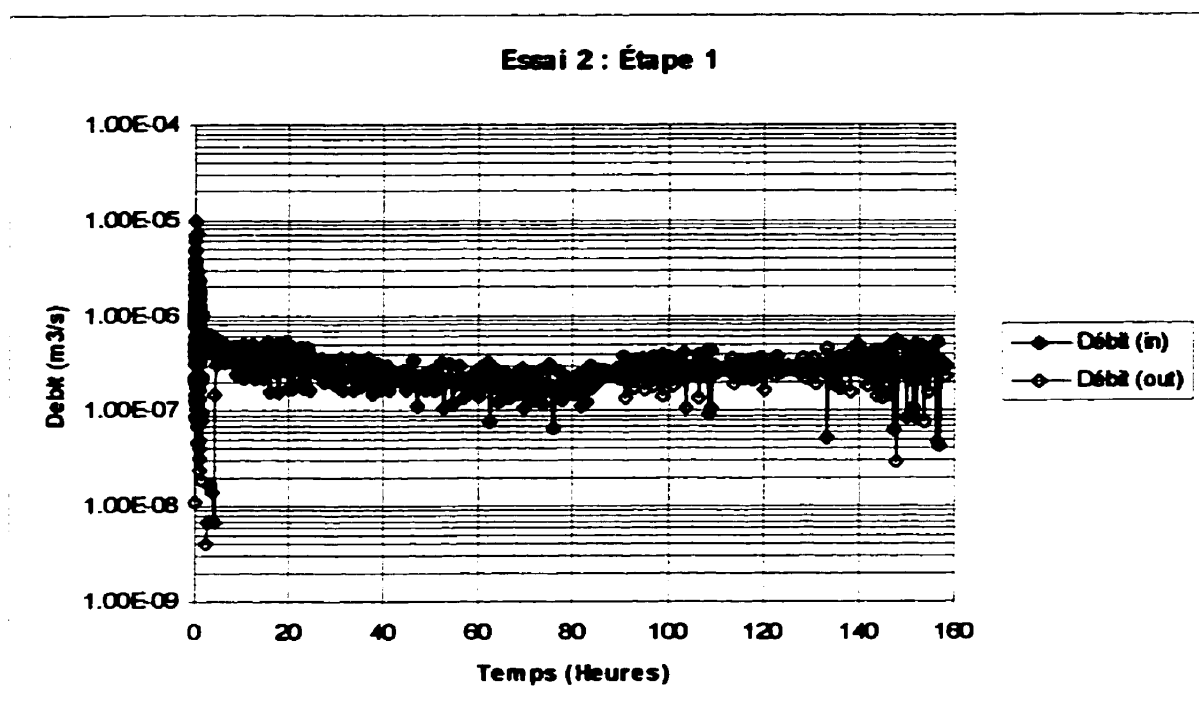


Figure C-9 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 1

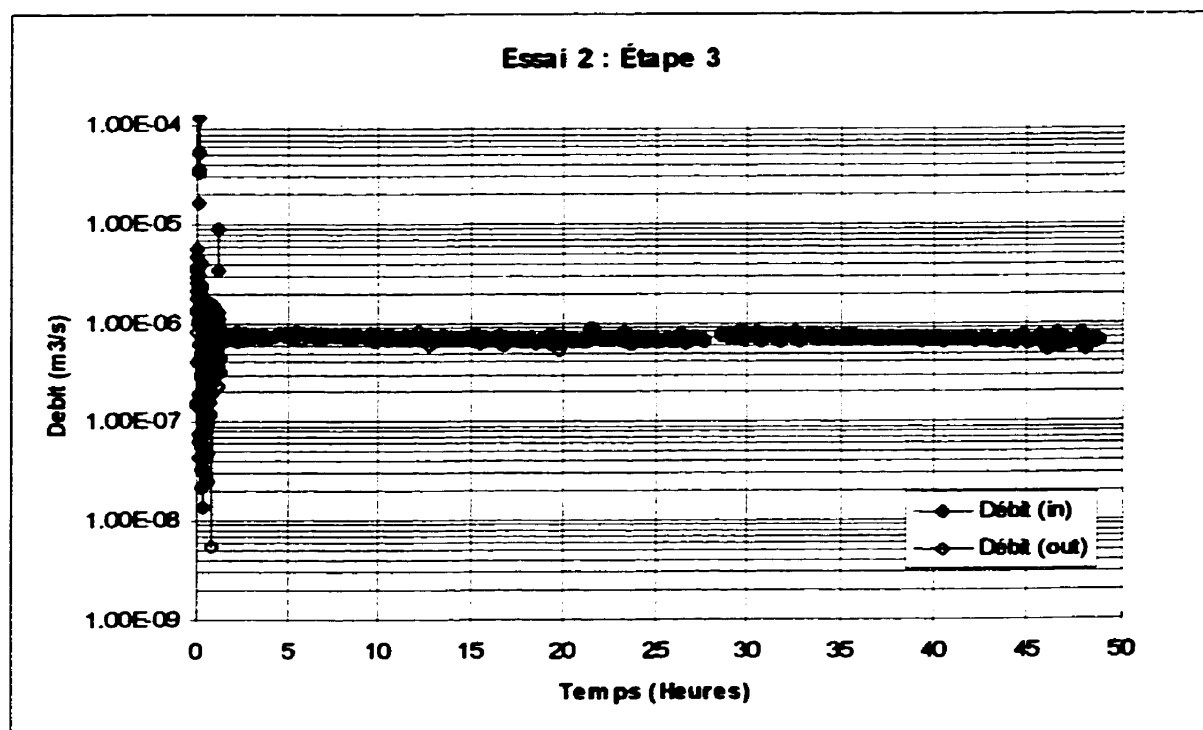


Figure C-10 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 3

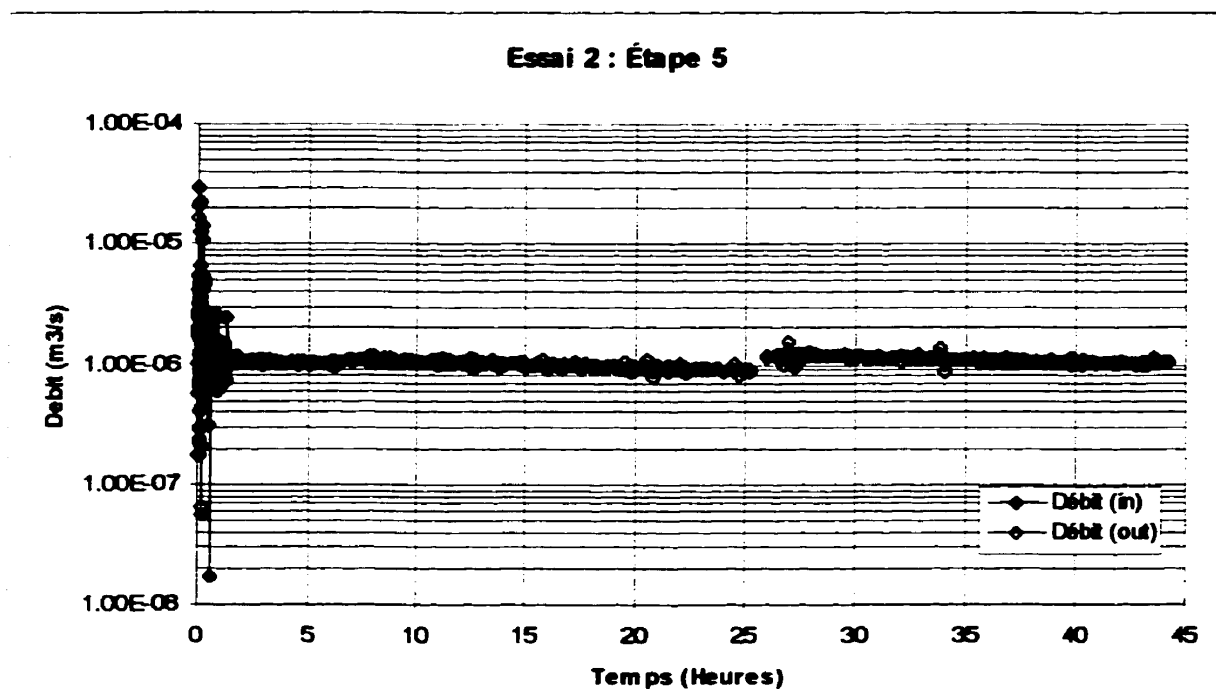


Figure C-11 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 5

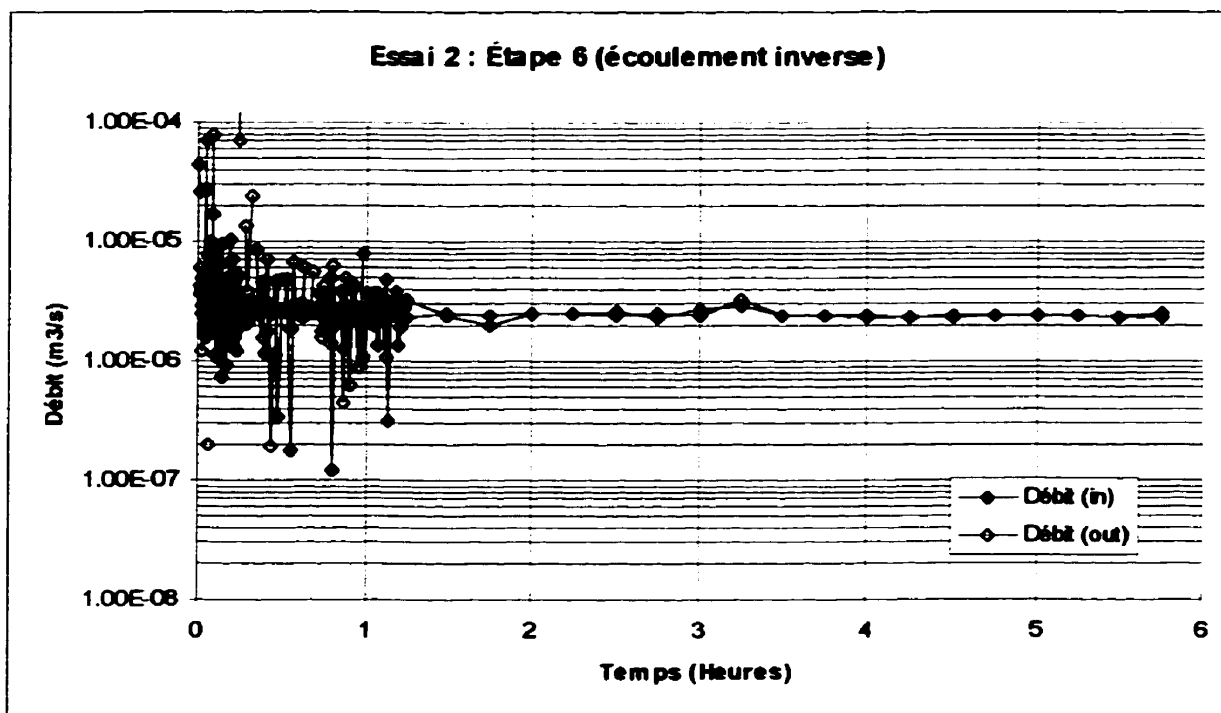


Figure C-12 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 6

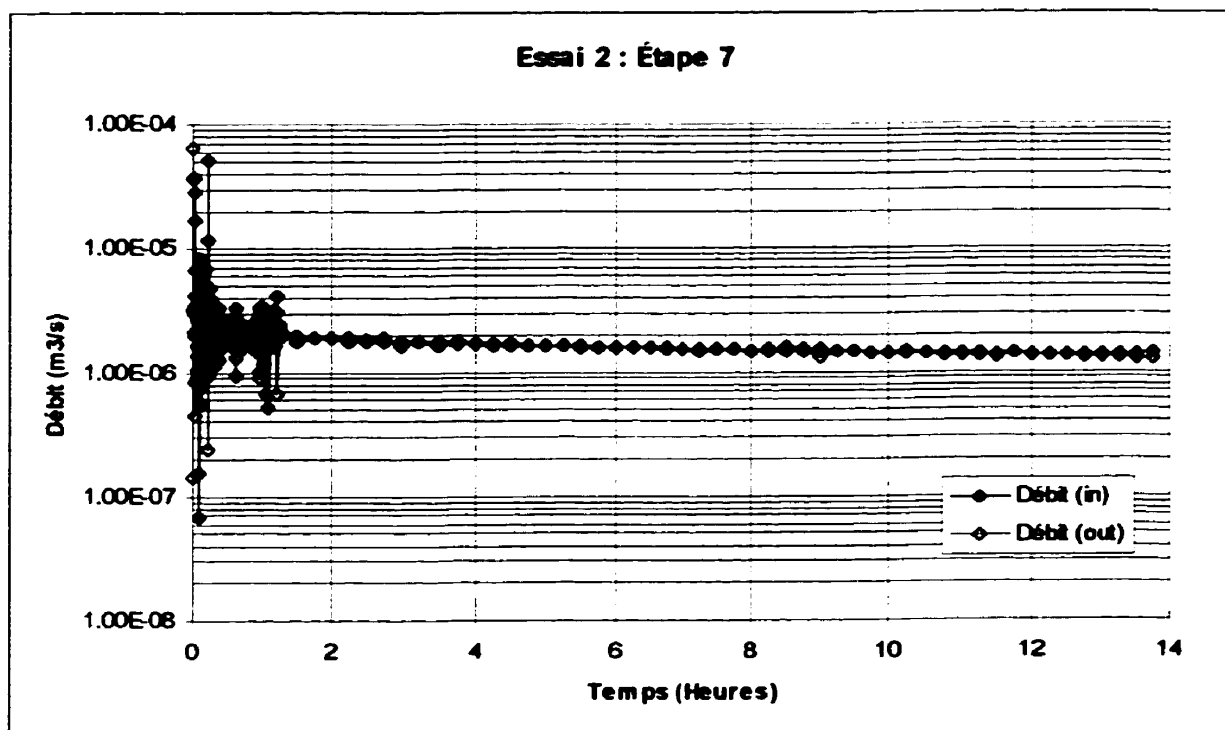


Figure C-13 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 7

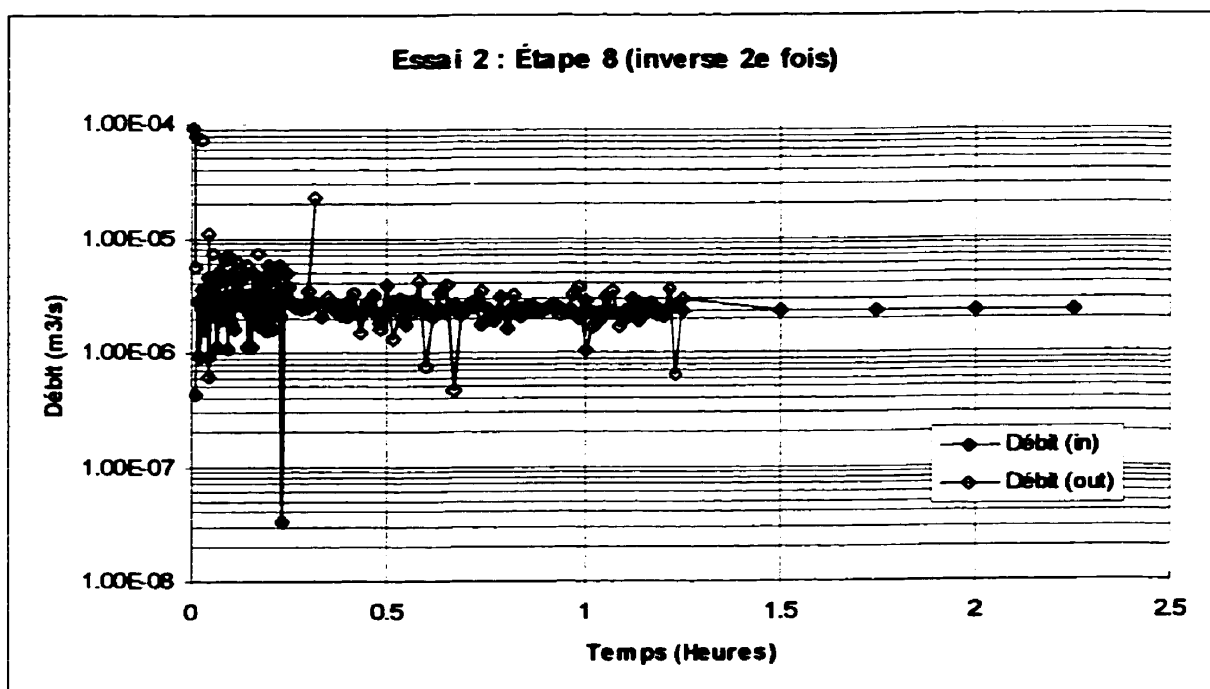


Figure C-14 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 8

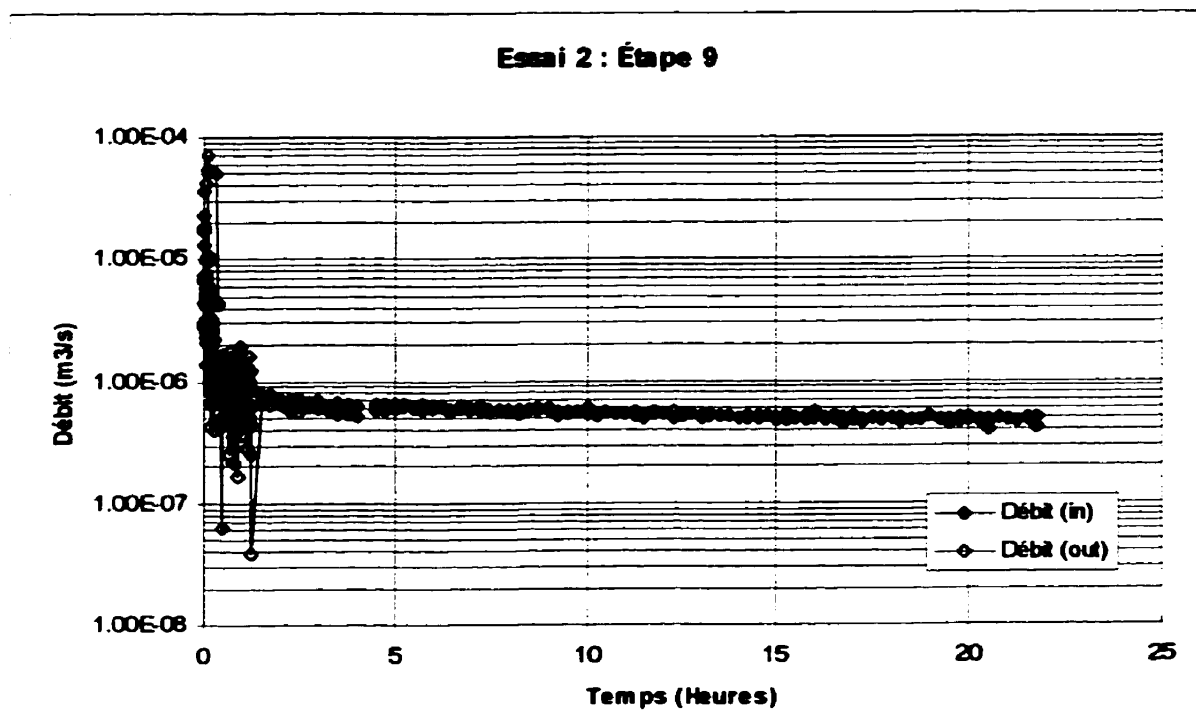


Figure C-15 : Variation des débits, in et out, lors de l'étape 9

ANNEXE D

**Résultats de l'essai no. 3 avec
le filtramètre horizontal**

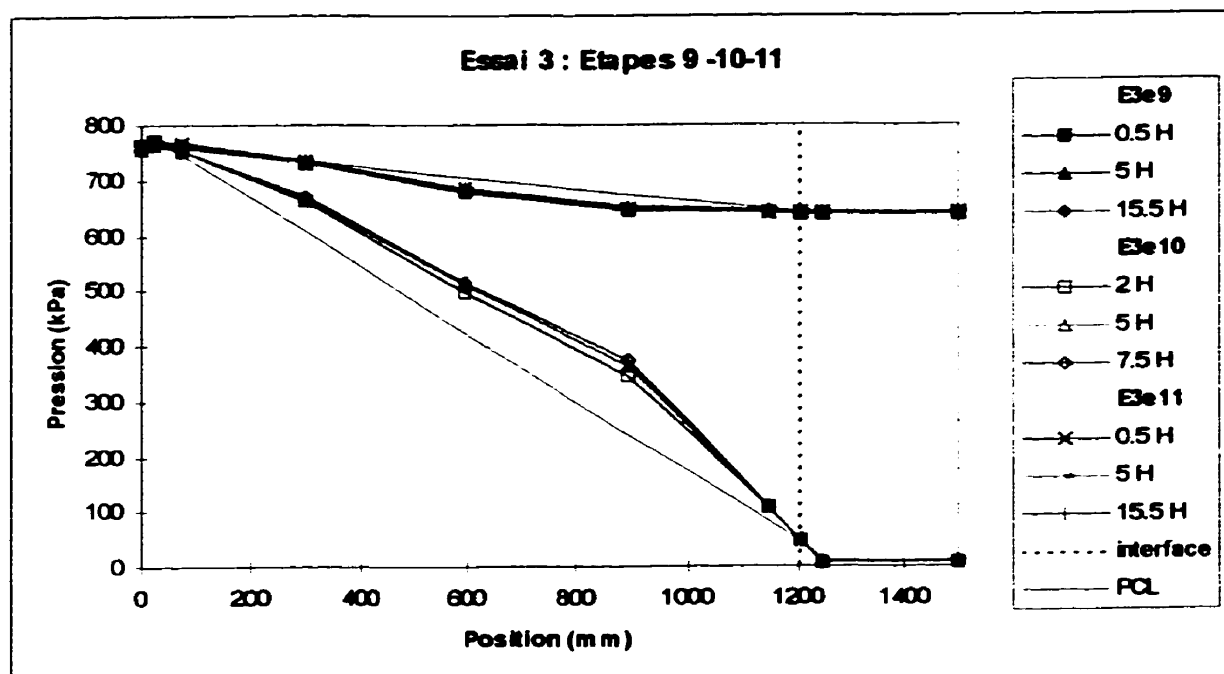


Figure D-1 : Distribution des pertes de charge lors des étapes 9 à 11

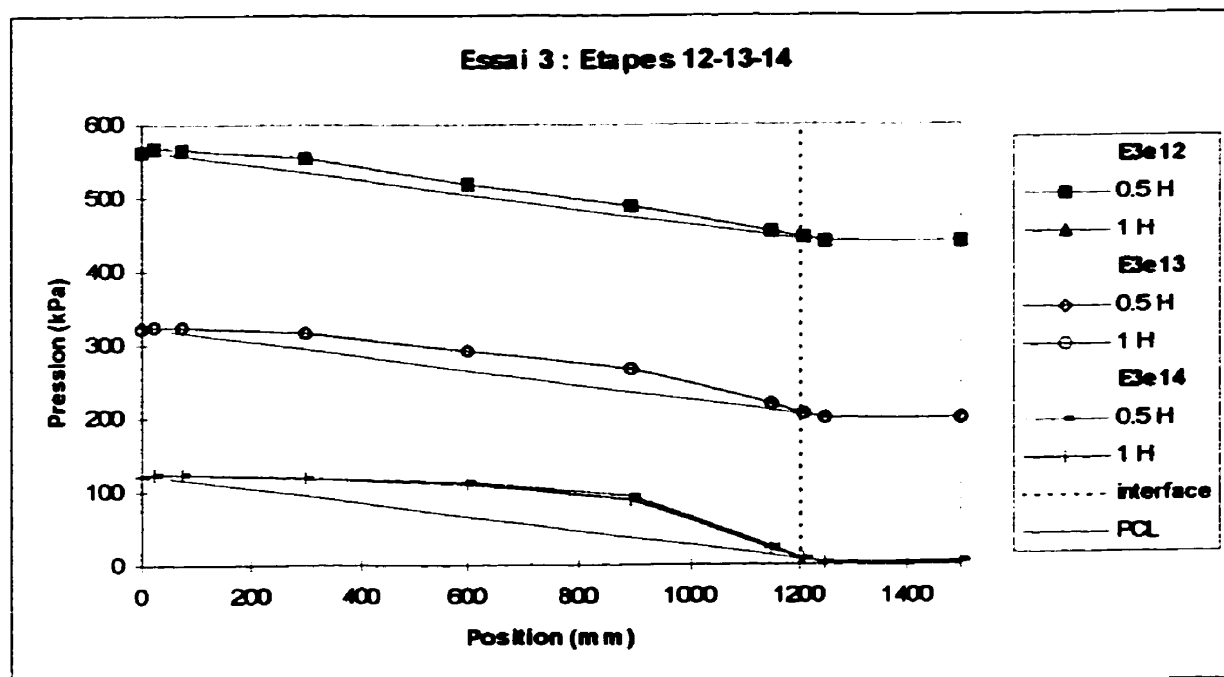


Figure D-2 : Distribution des pertes de charge lors des étapes 12 à 14

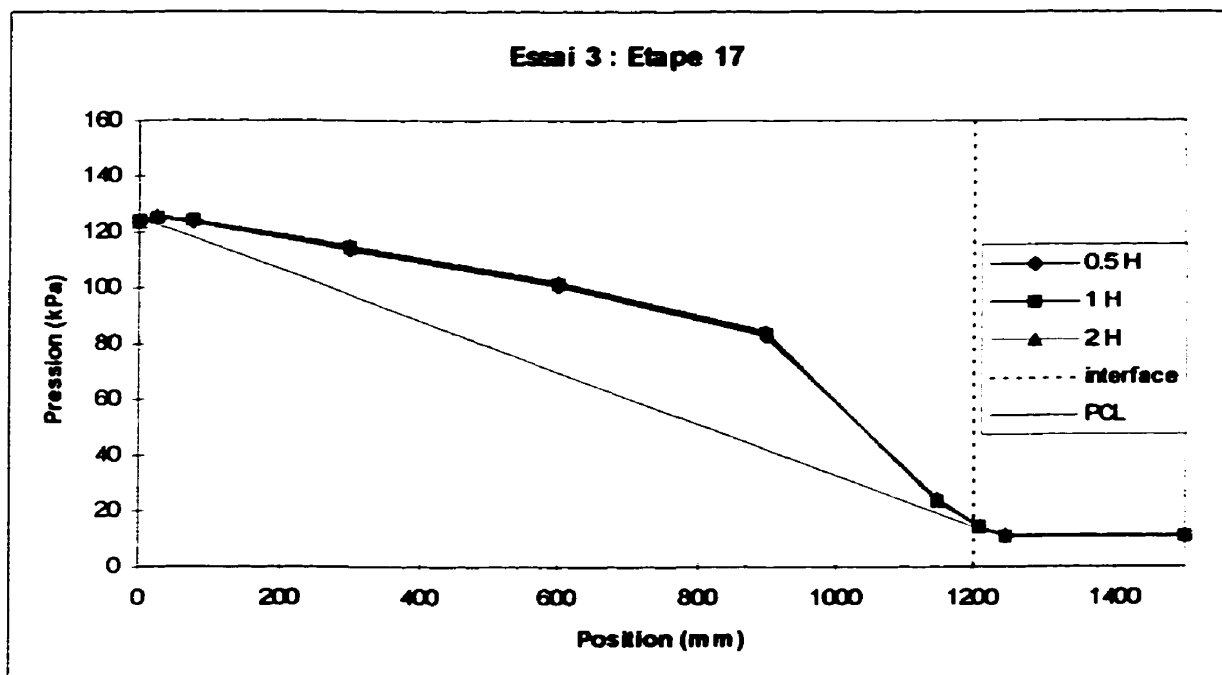


Figure D-3 : Distribution des pertes de charge lors de l'étape 17

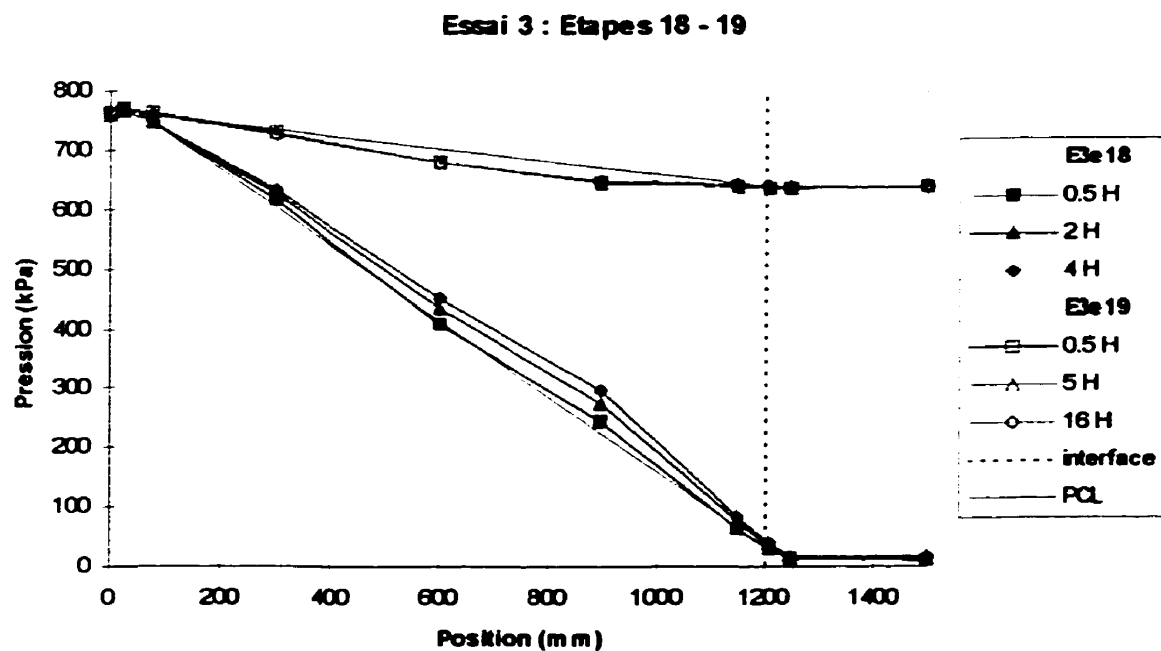


Figure D-4 : Distribution des pertes de charge lors des étapes 18 et 19

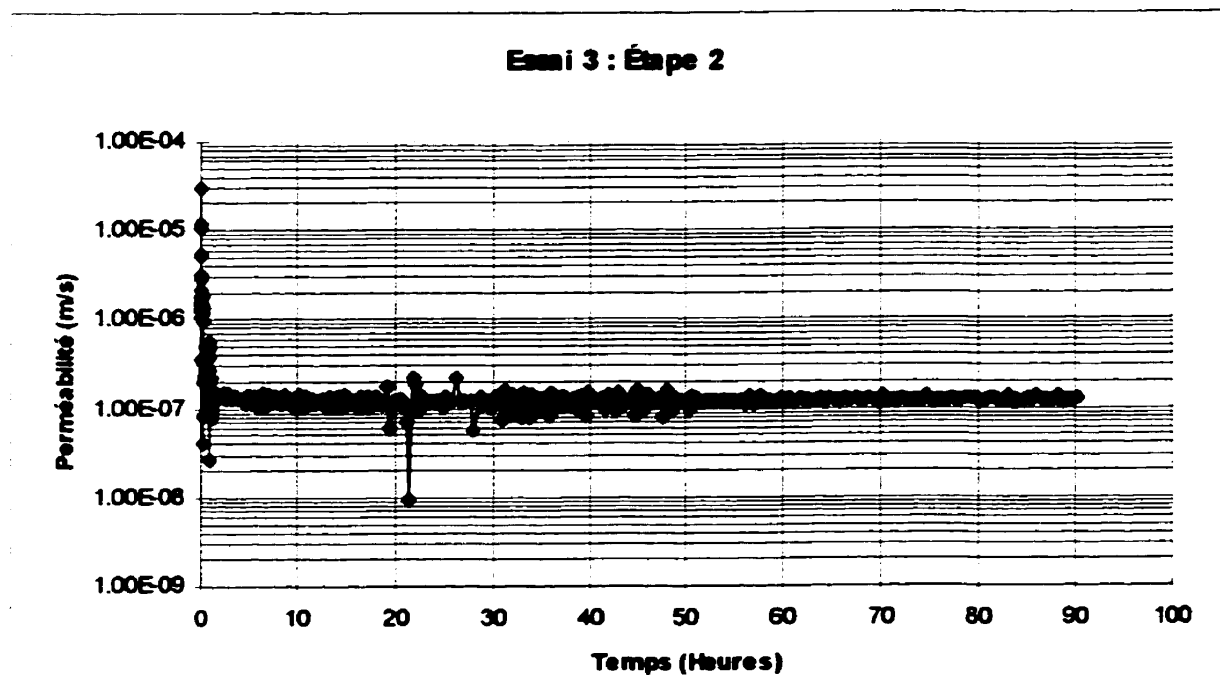


Figure D-5 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 2

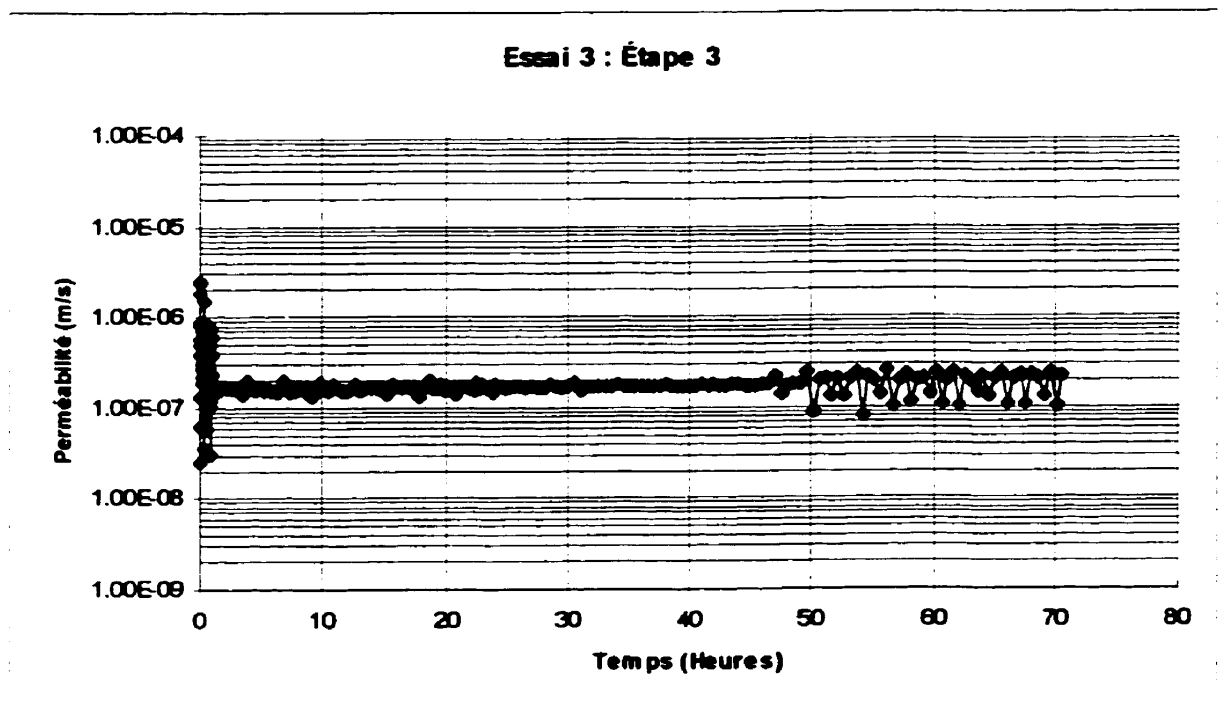


Figure D-6 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 3

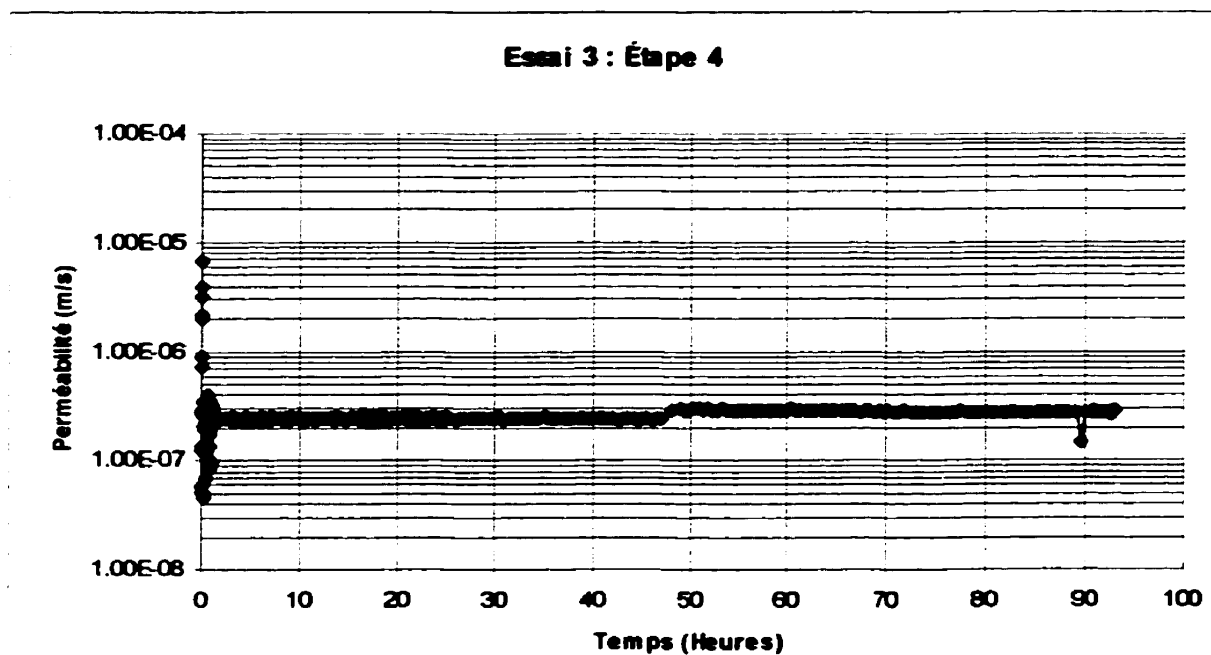


Figure D-7 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 4

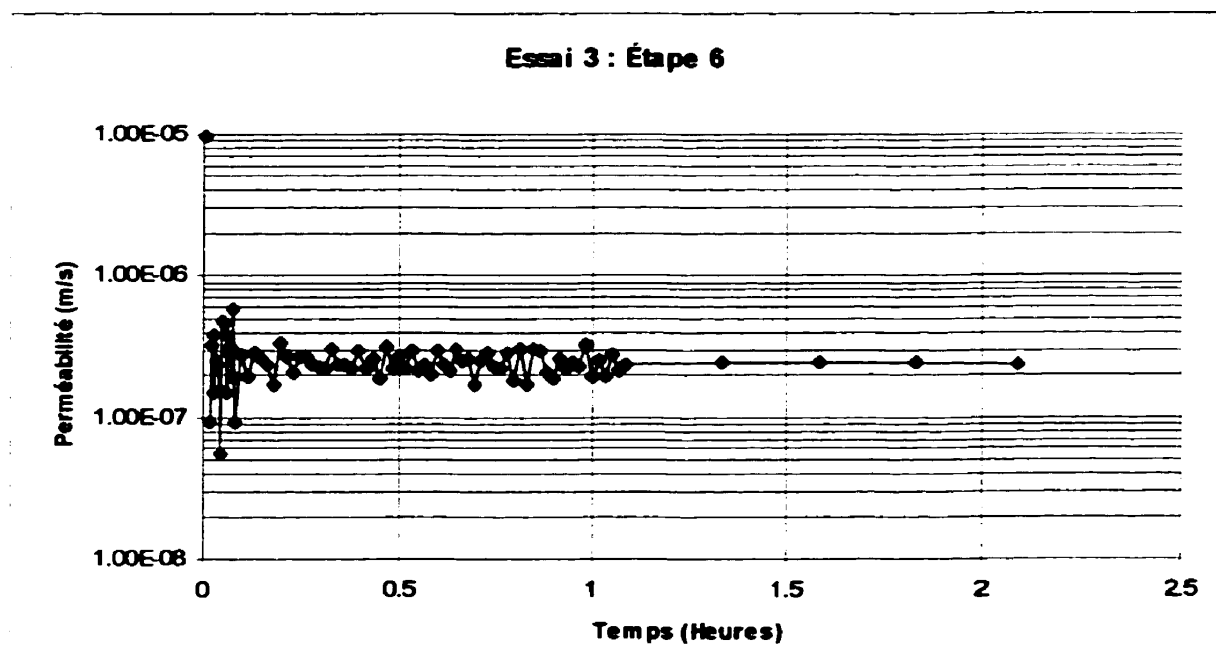


Figure D-8 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 6

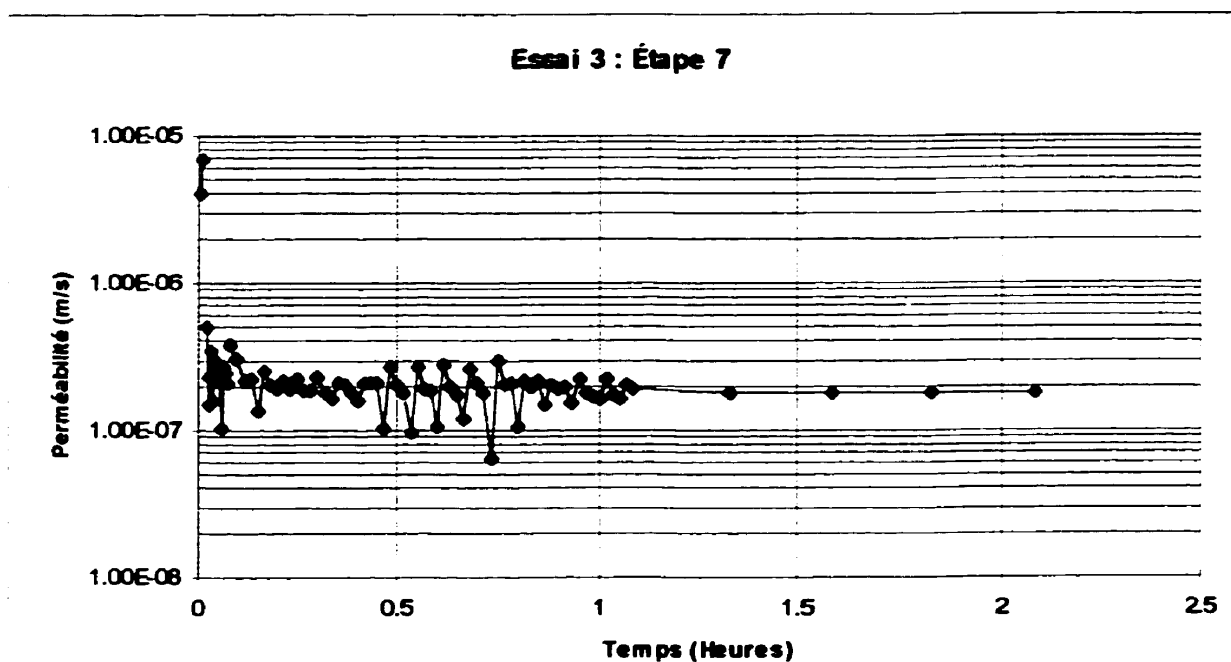


Figure D-9 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 7

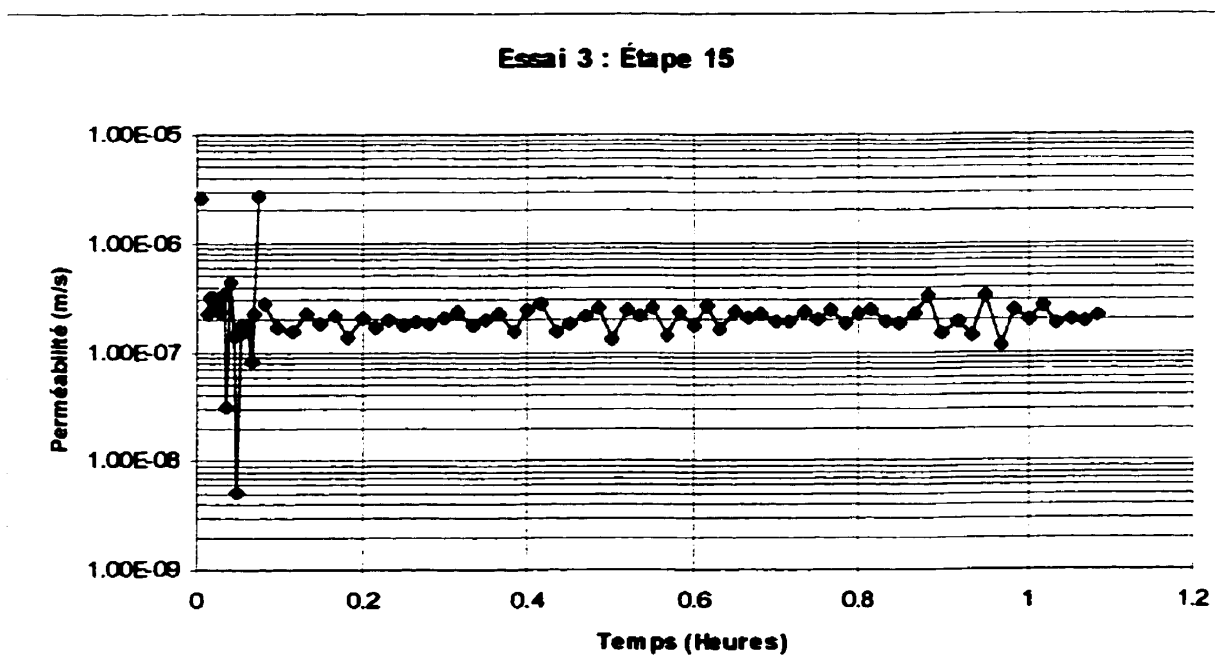


Figure D-10 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 15

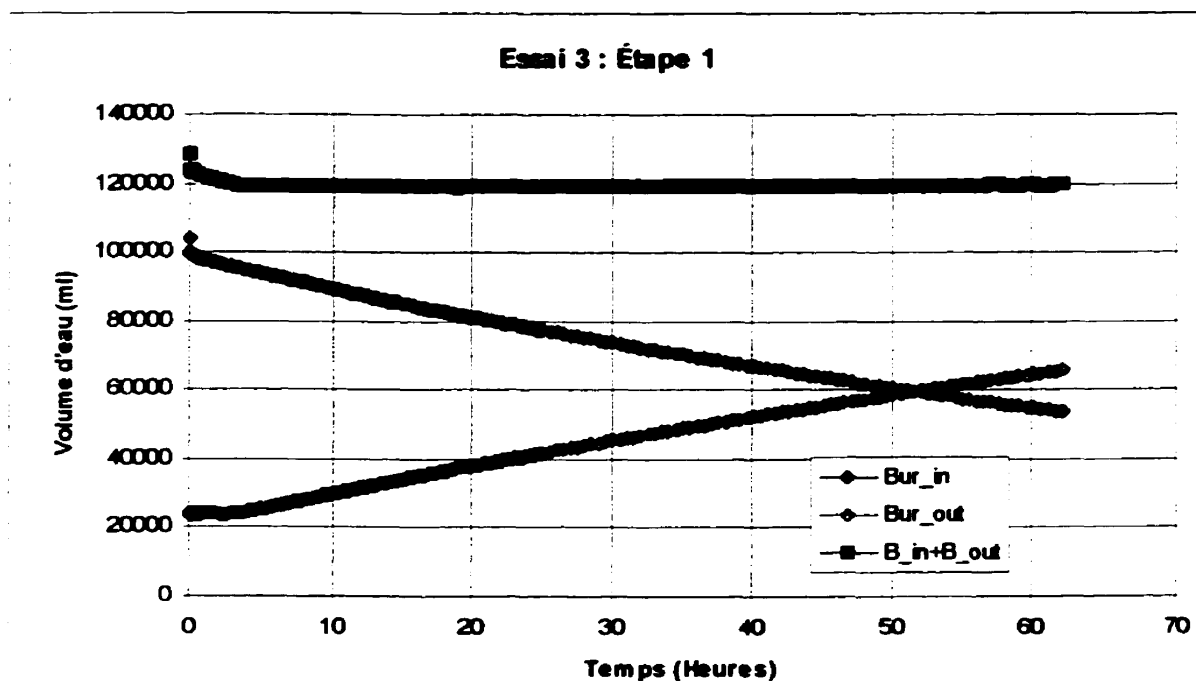


Figure D-11 : Variation du volume d'eau dans les burettes lors de l'étape 1

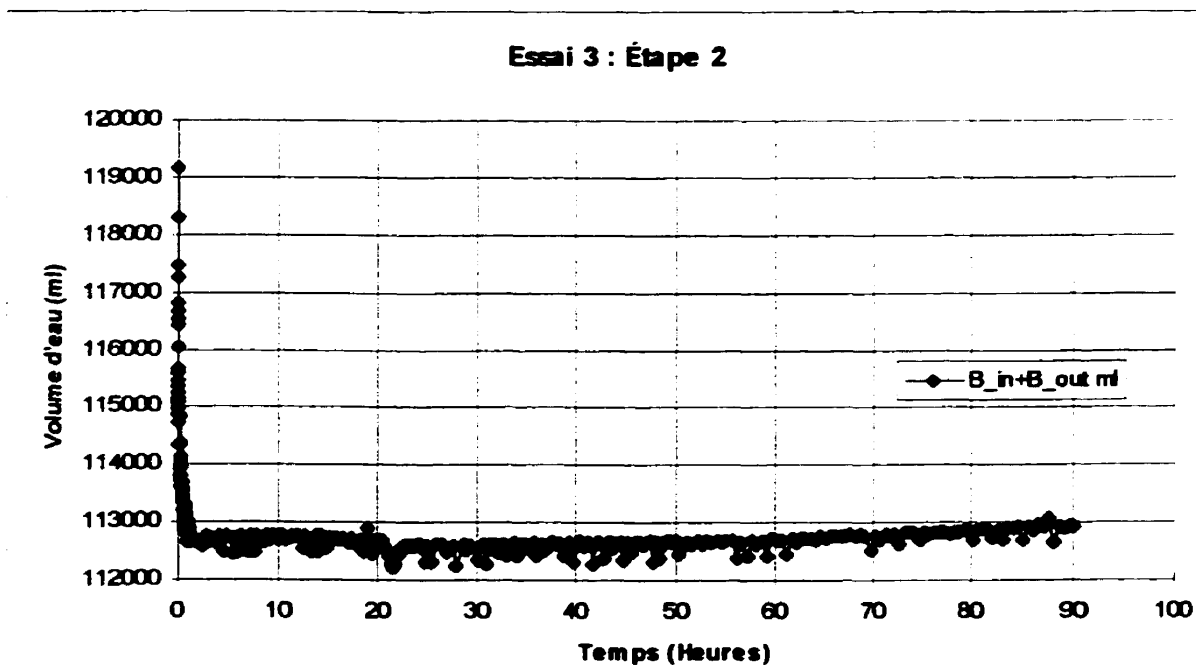


Figure D-12 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors de l'étape 2

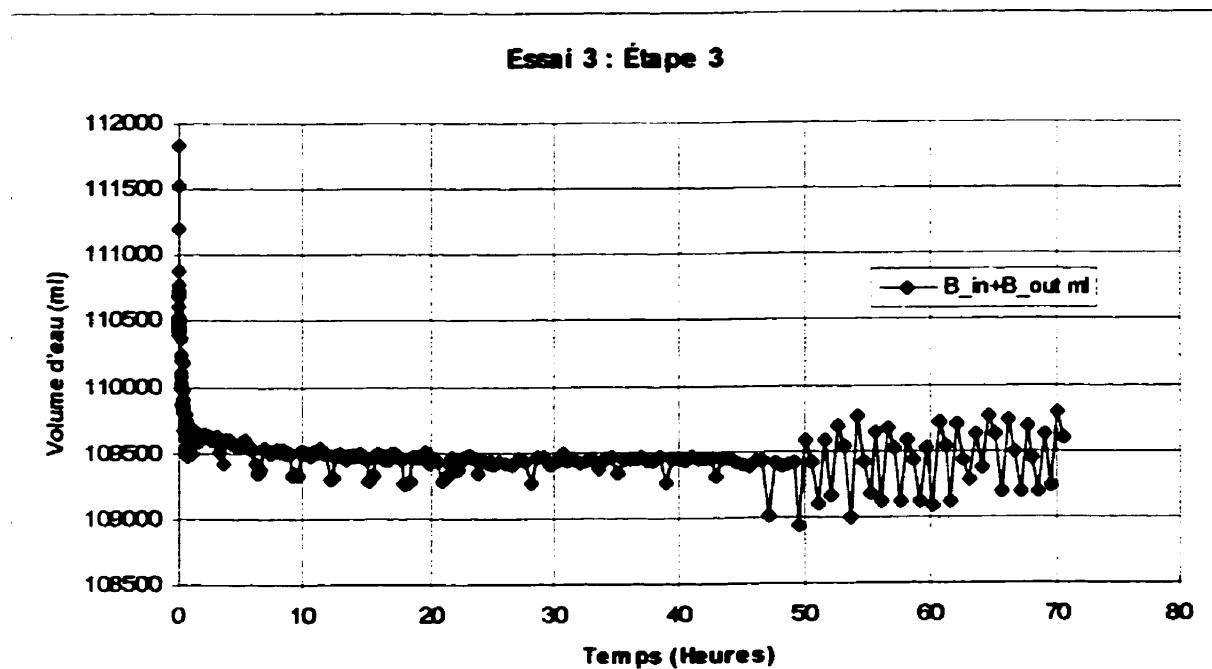


Figure D-13 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors de l'étape 3

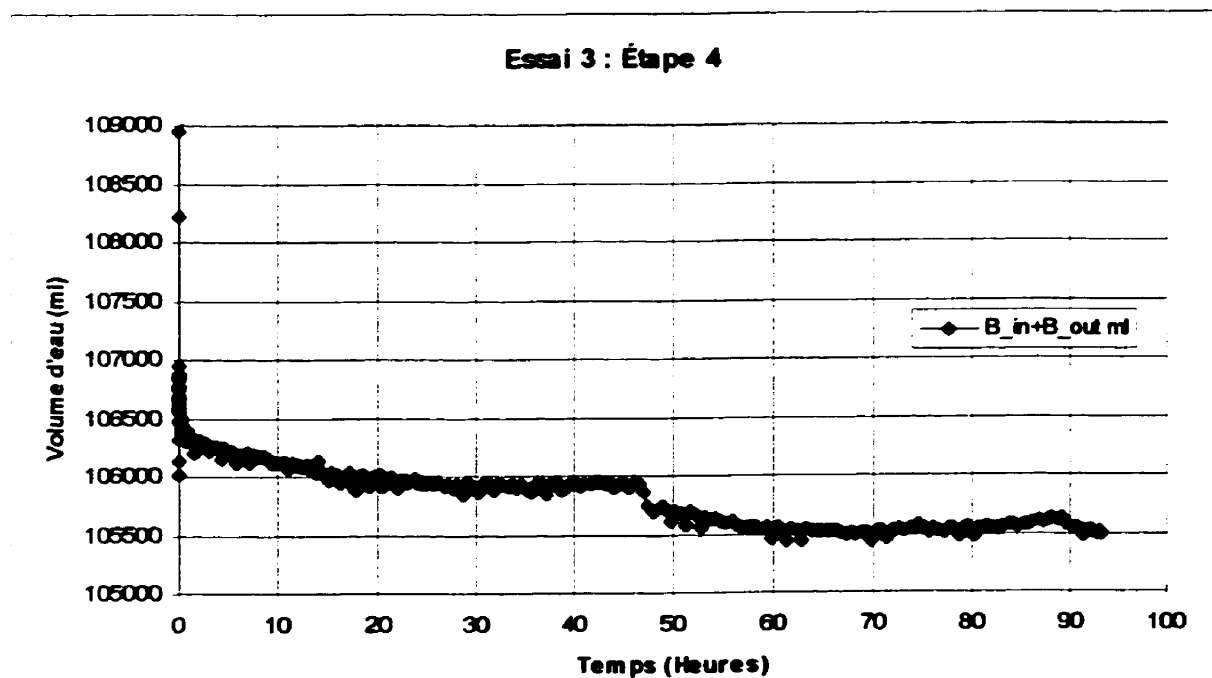


Figure D-14 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors de l'étape 4

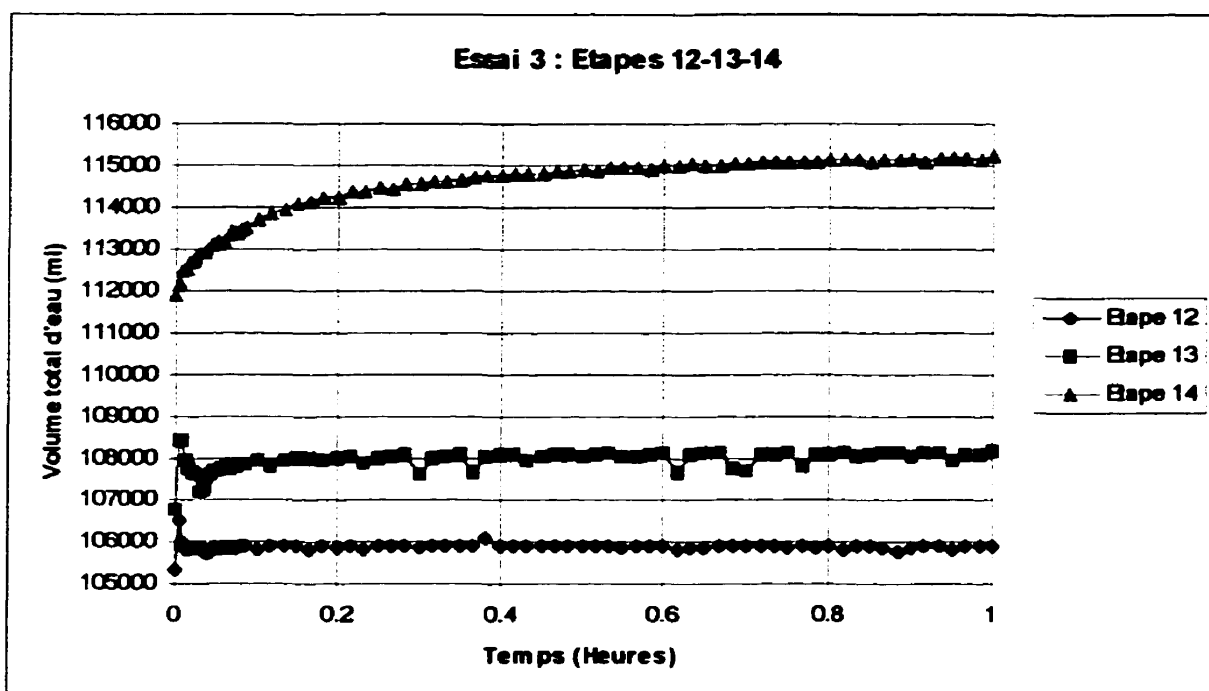


Figure D-15 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors des étapes 12 à 14

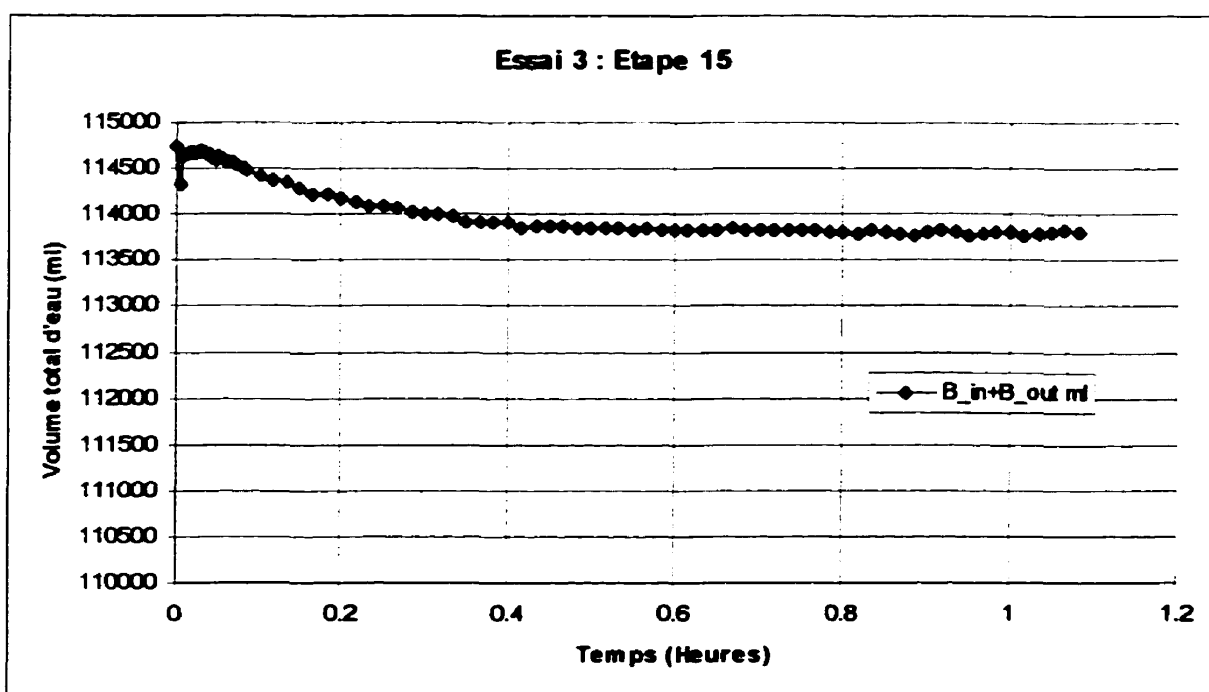


Figure D-16 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors de l'étape 15

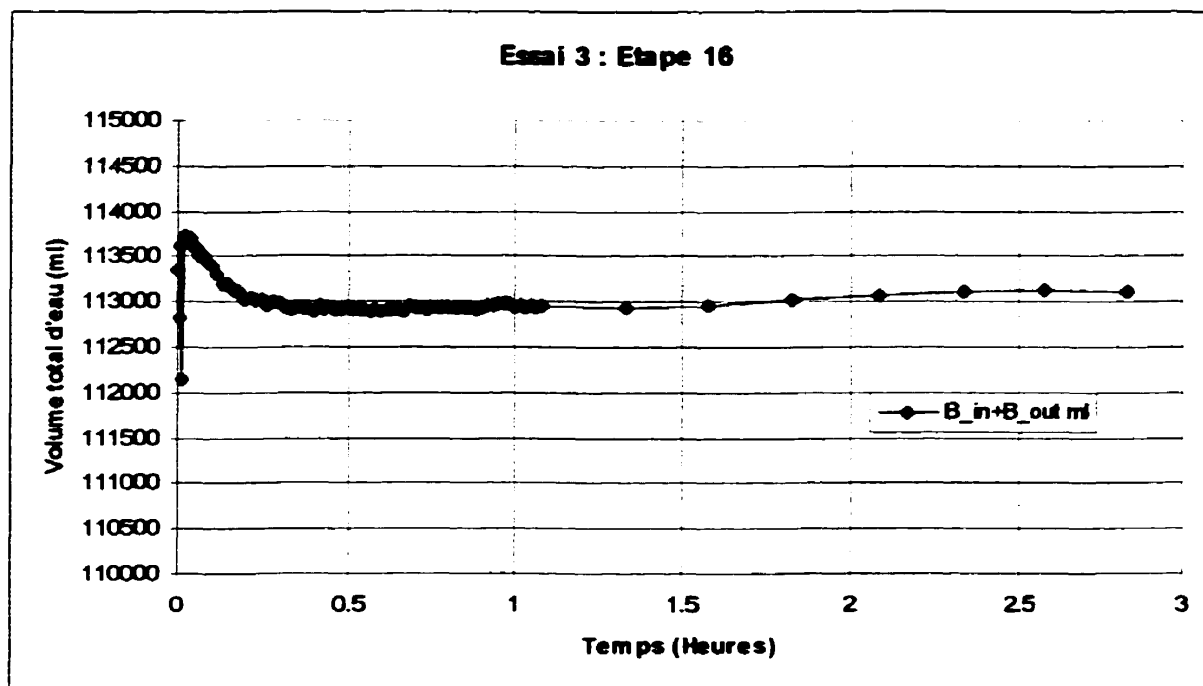


Figure D-17 : Variation du volume d'eau total dans les burettes lors de l'étape 16

ANNEXE E

**Résultats de l'essai no. 4 avec
le filtramètre horizontal**

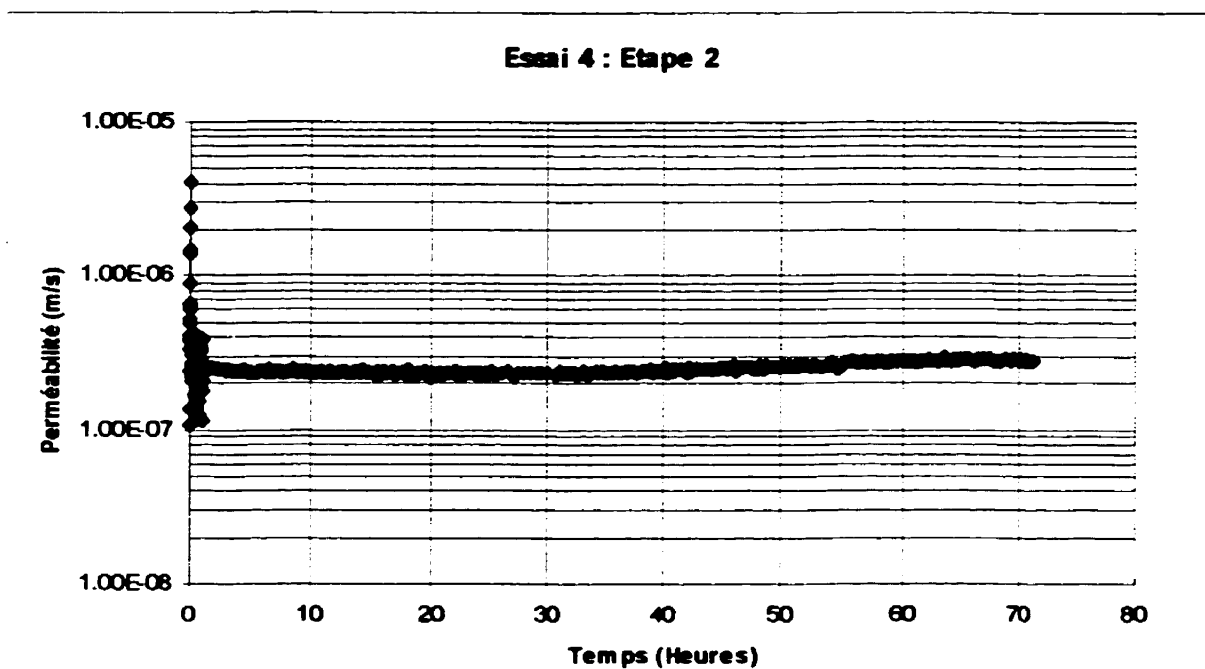


Figure E-1 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 2

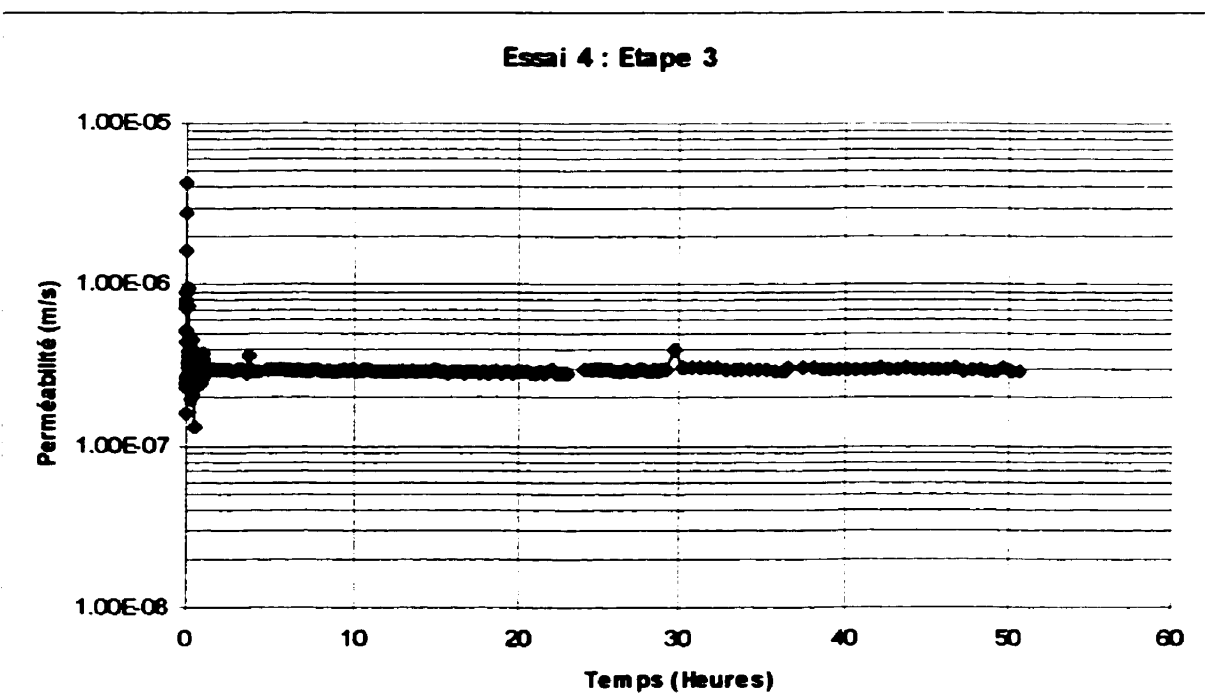


Figure E-2 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 3

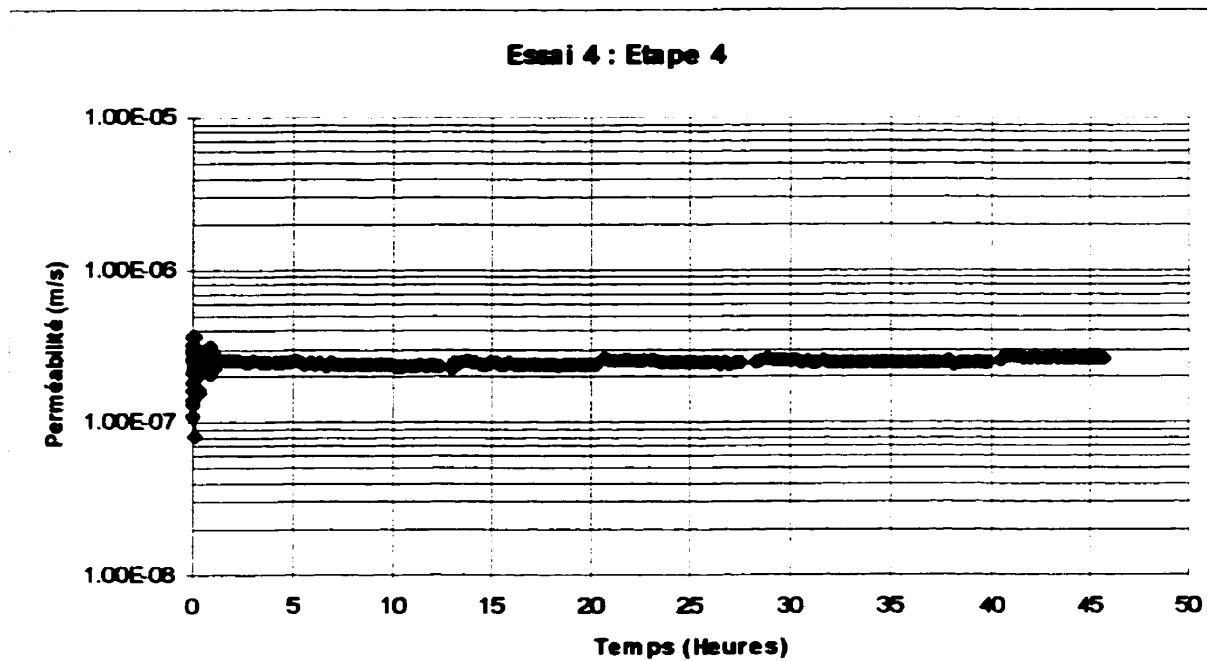


Figure E-3 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 4

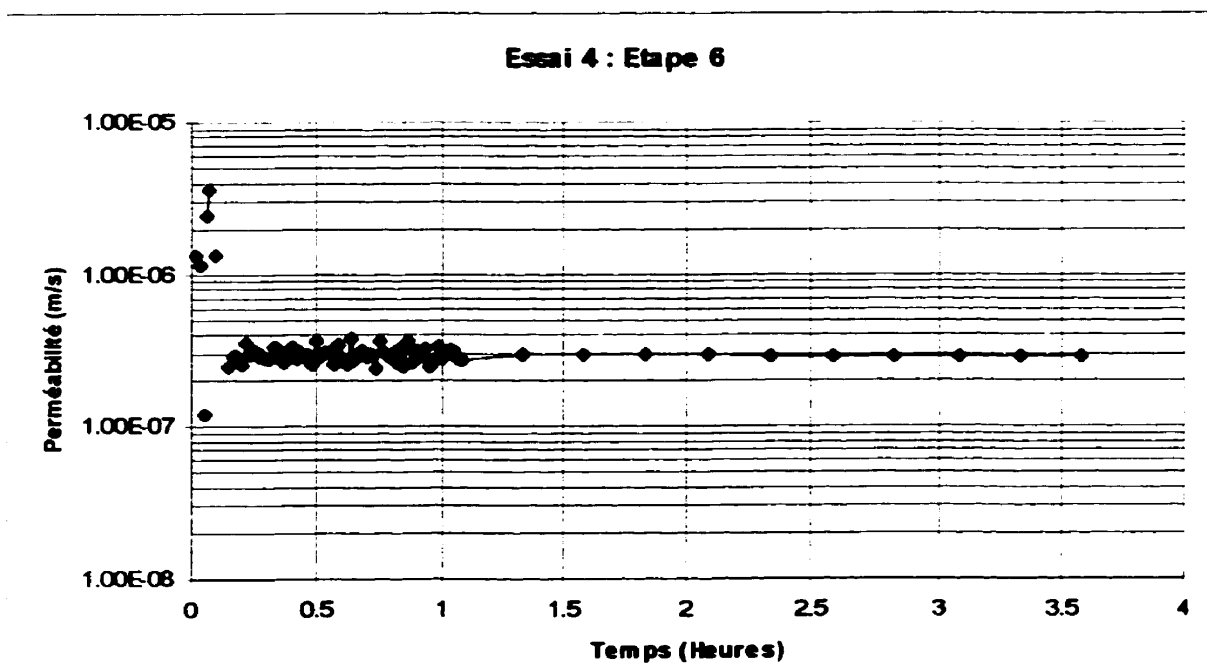


Figure E-4 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 6

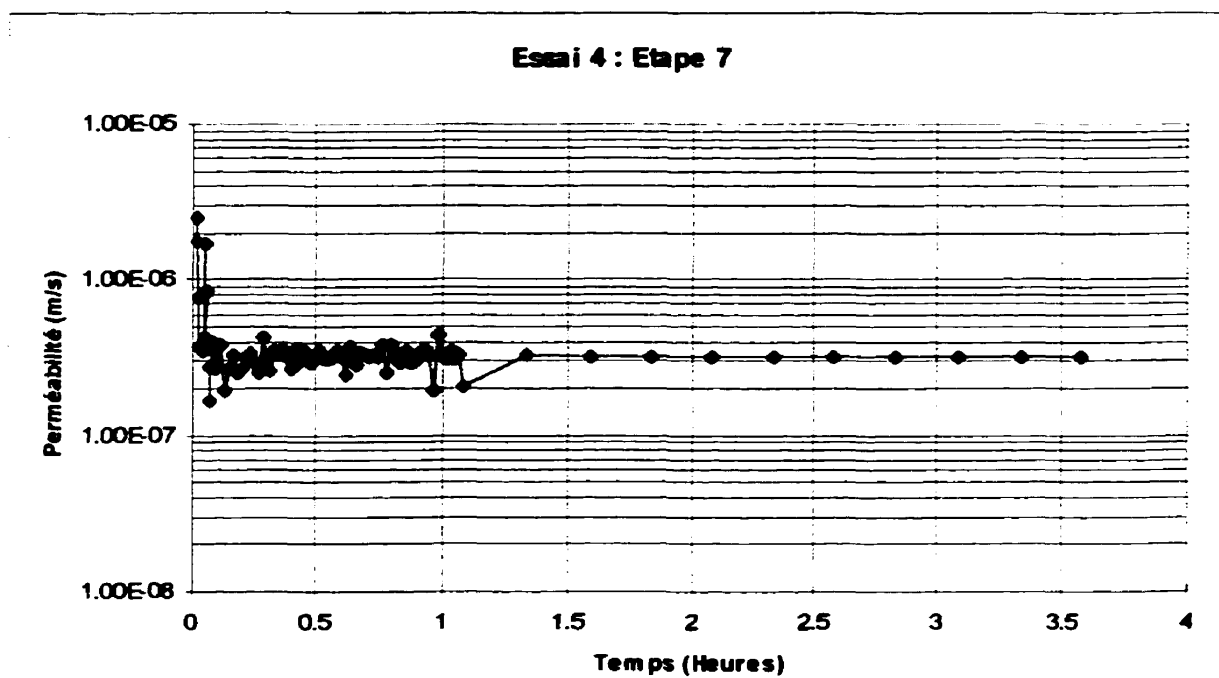


Figure E-5 : Variation de la perméabilité globale lors de l'étape 7

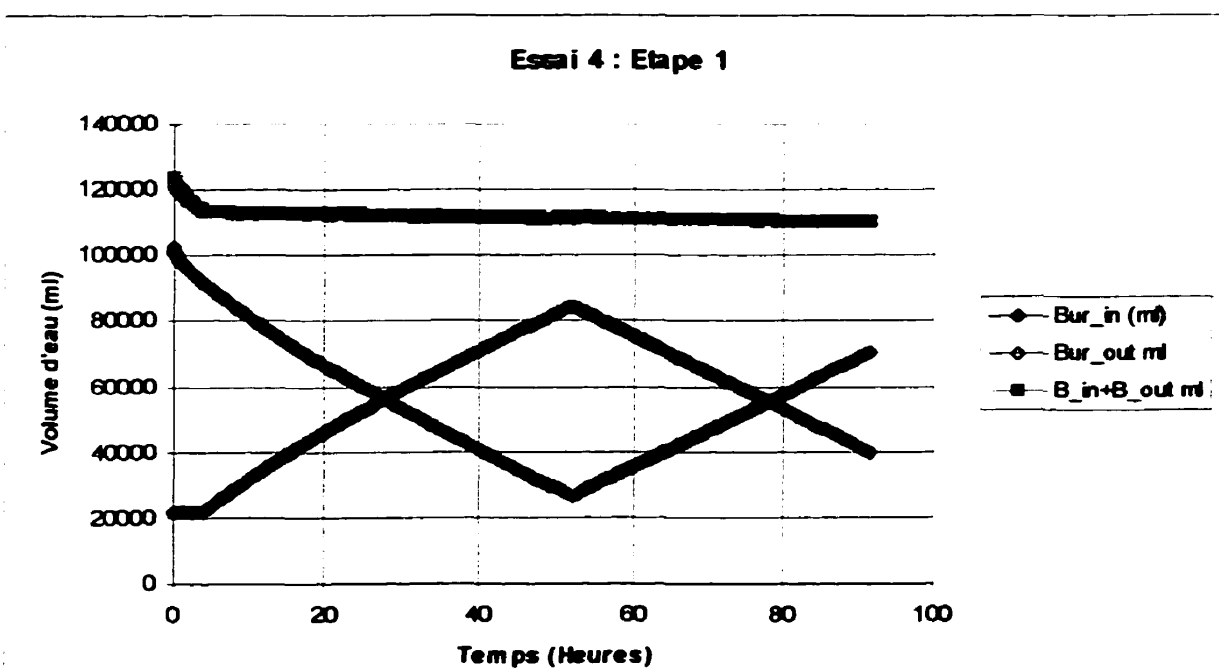


Figure E-6 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 1

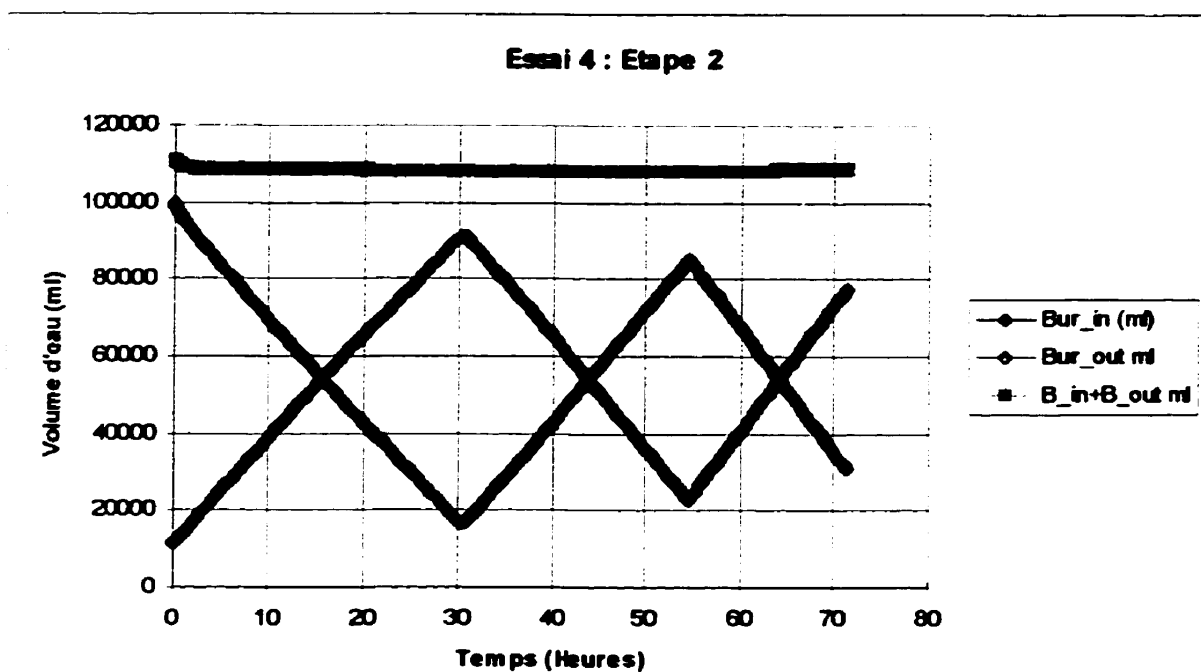


Figure E-7 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 2

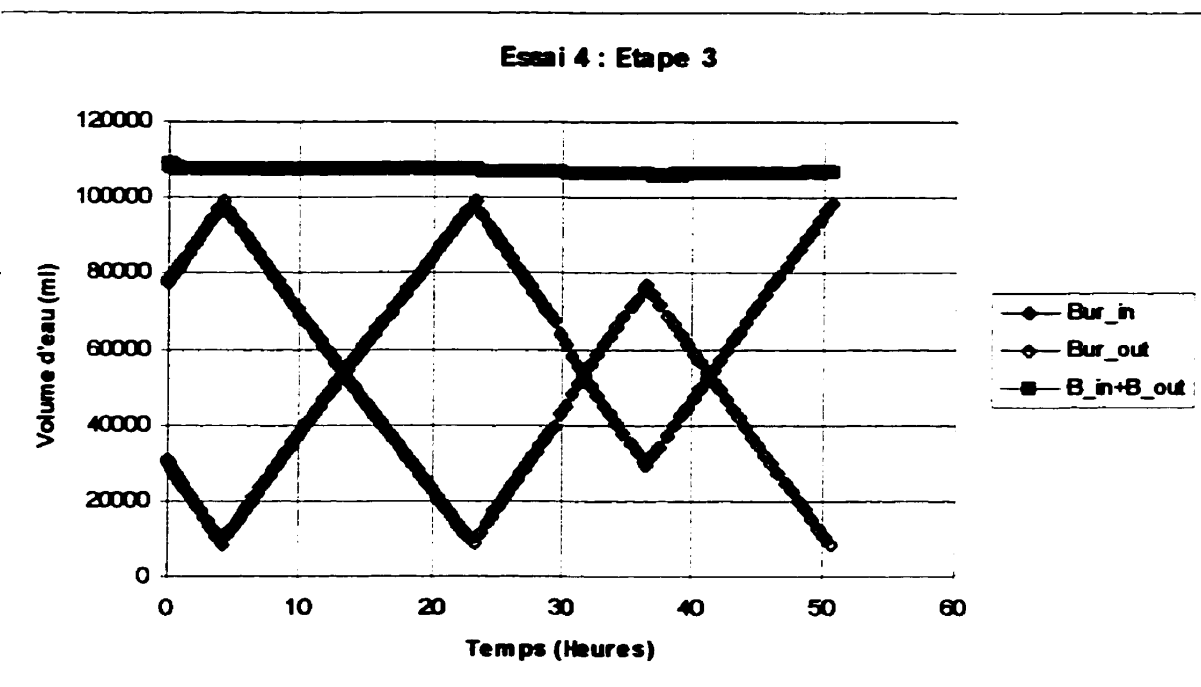


Figure E-8 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 3

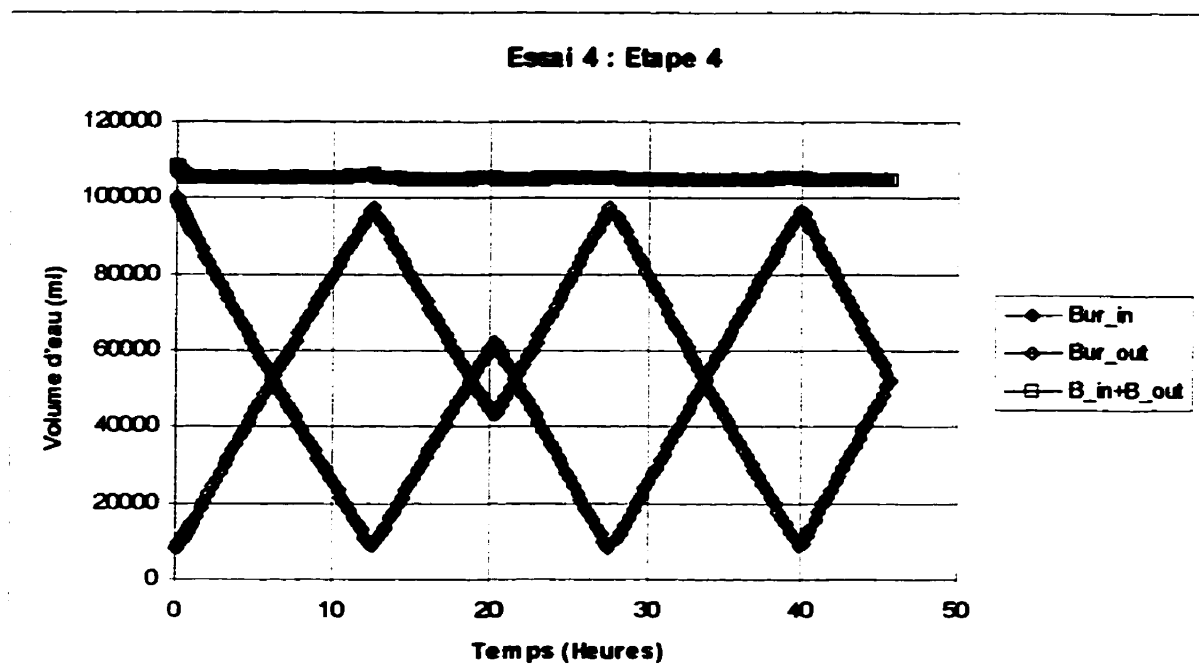


Figure E-9 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 4

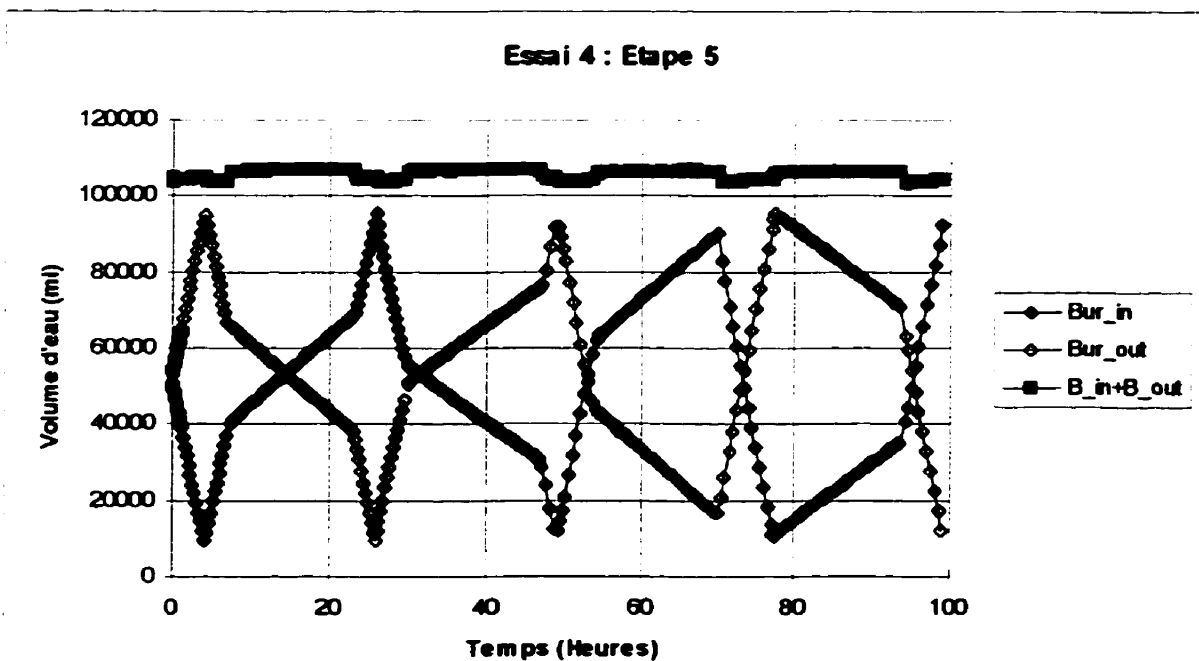


Figure E-10 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 5

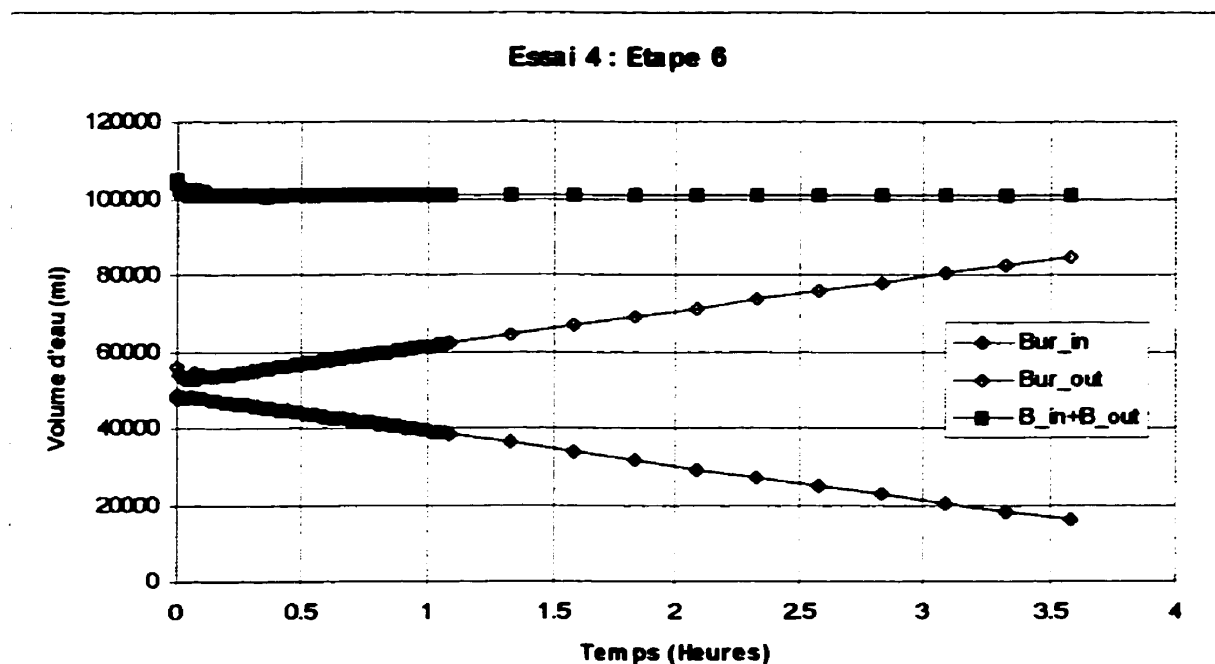


Figure E-11 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 6

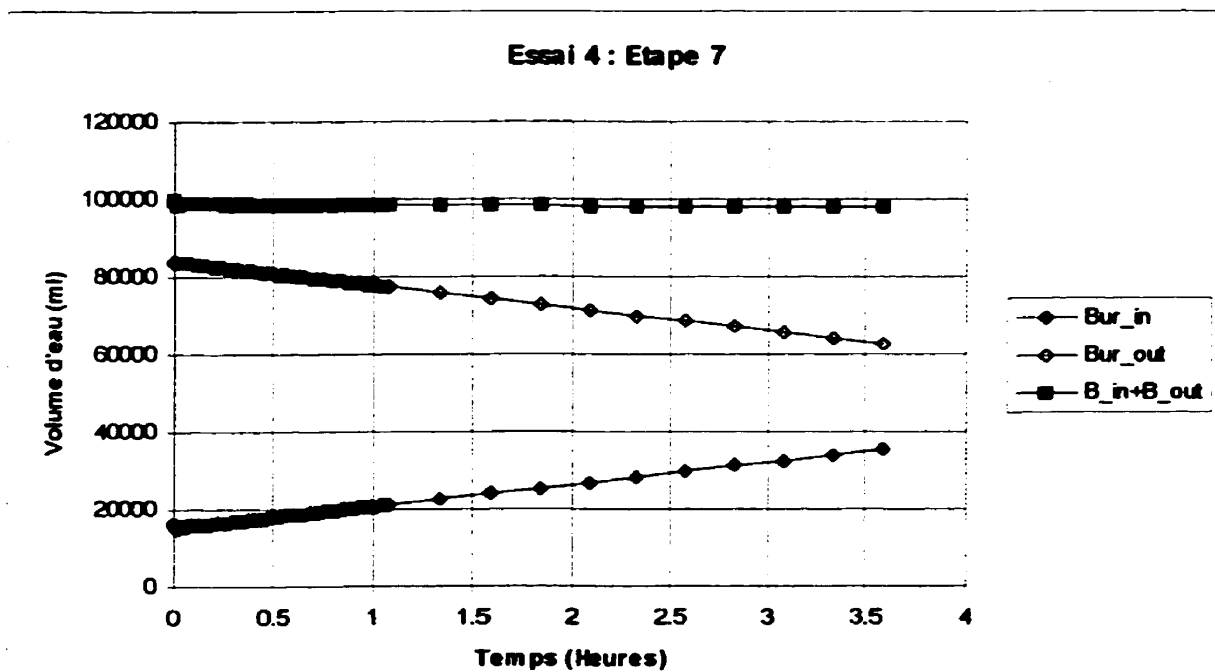


Figure E-12 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 7

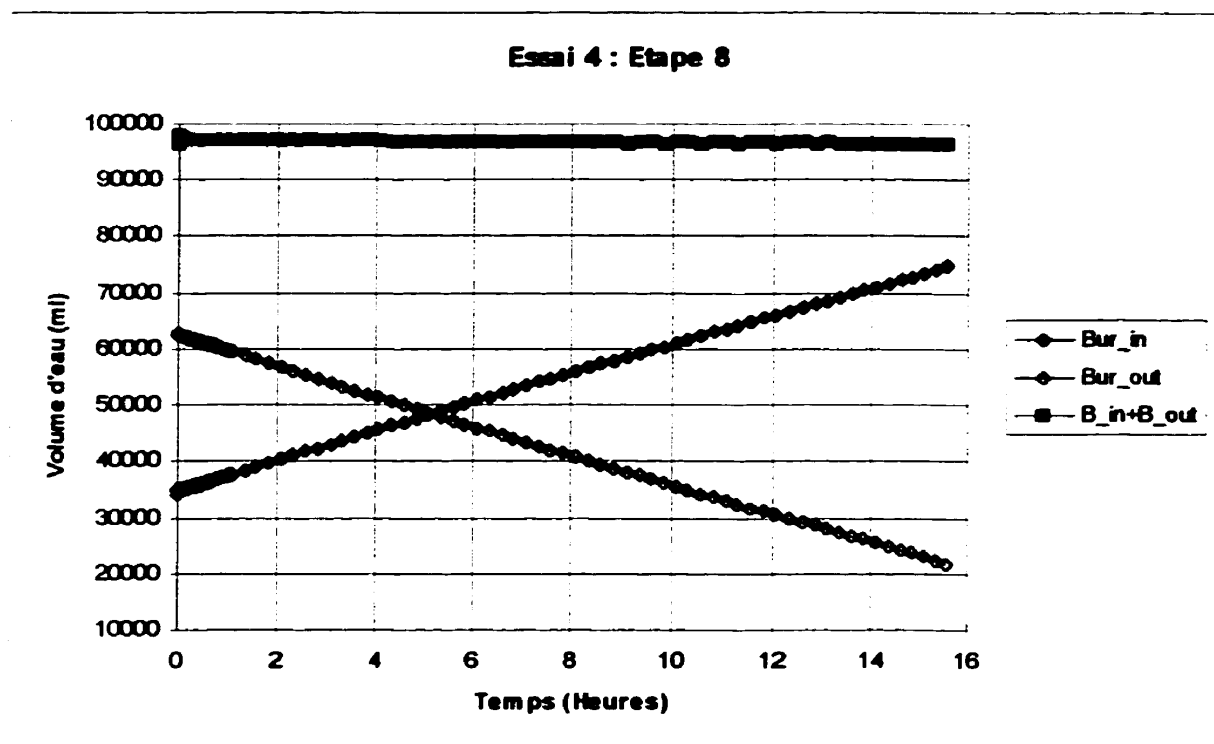


Figure E-13 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 8

ANNEXE F

**Résultats de l'essai no. 5 avec
le filtramètre horizontal**

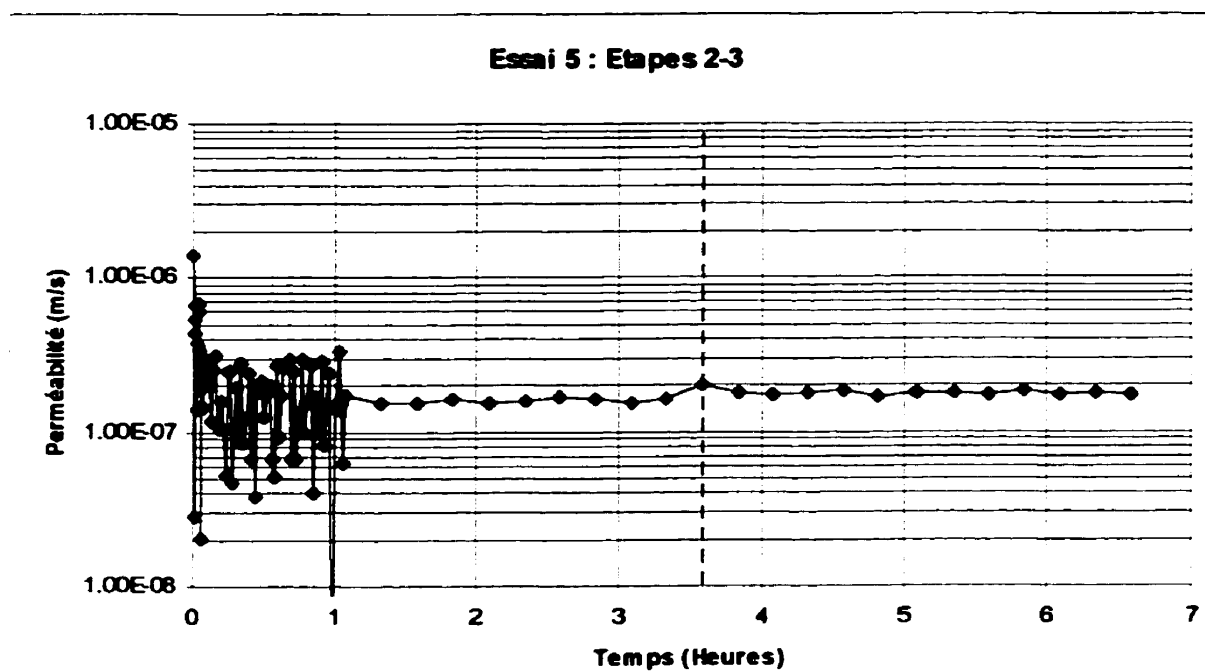


Figure F-1 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 2 et 3

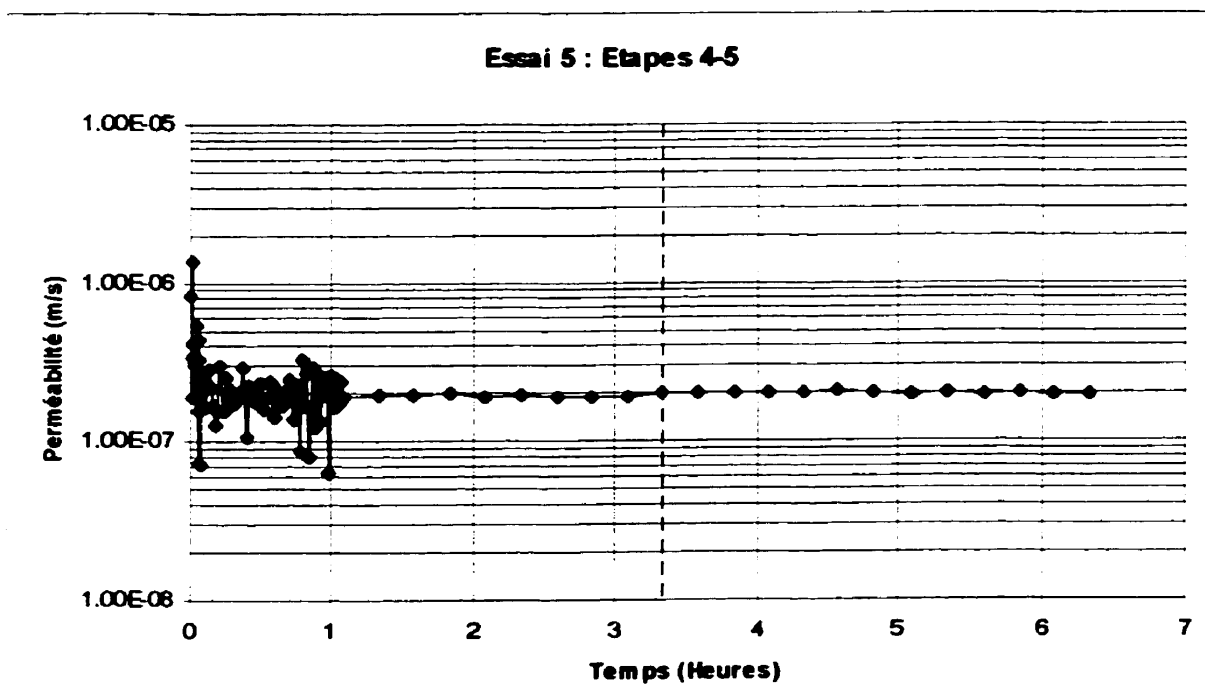


Figure F-2 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 4 et 5

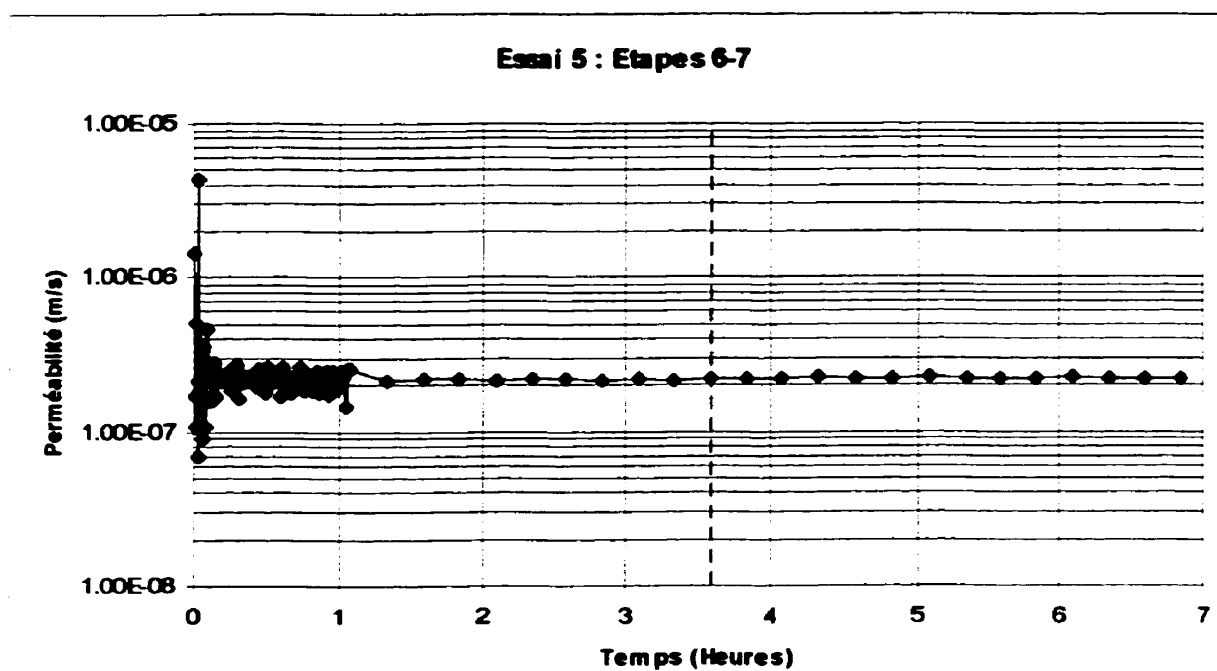


Figure F-3 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 6 et 7

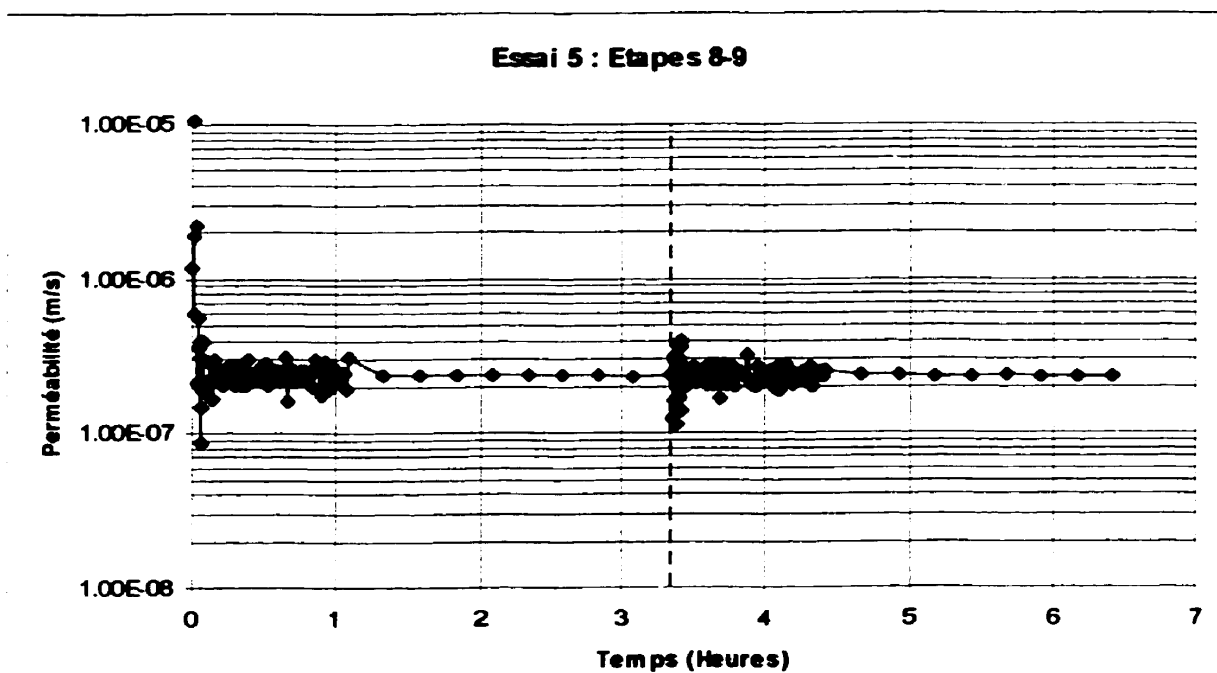


Figure F-4 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 8 et 9

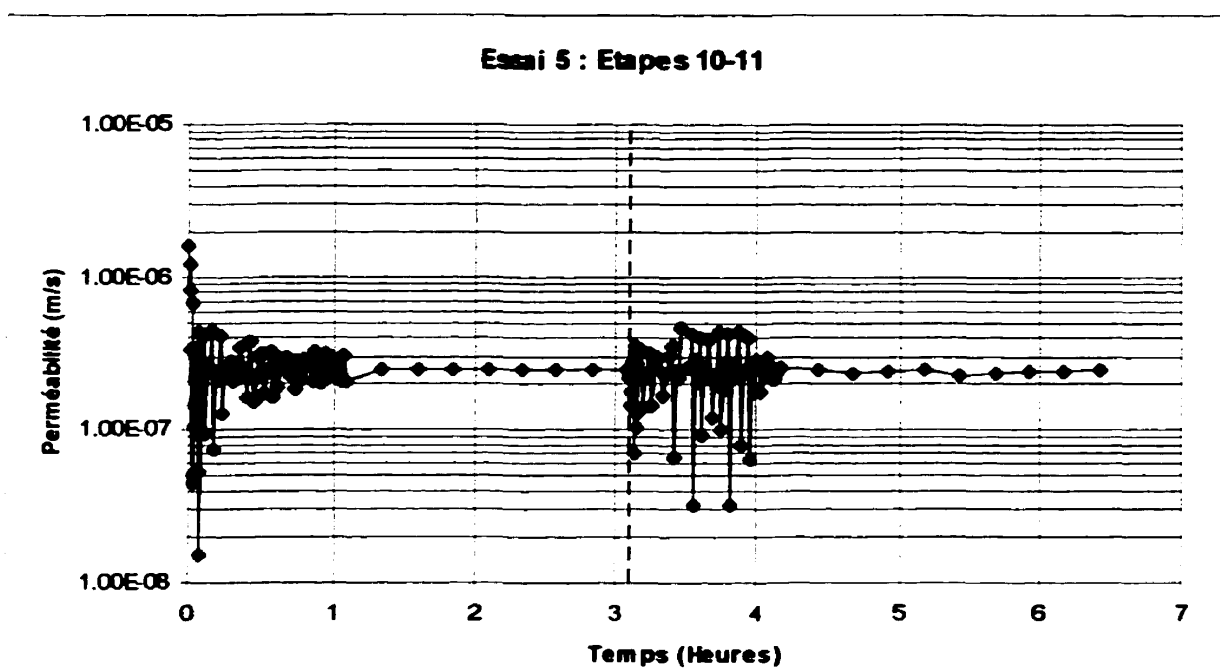


Figure F-5 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 10 et 11

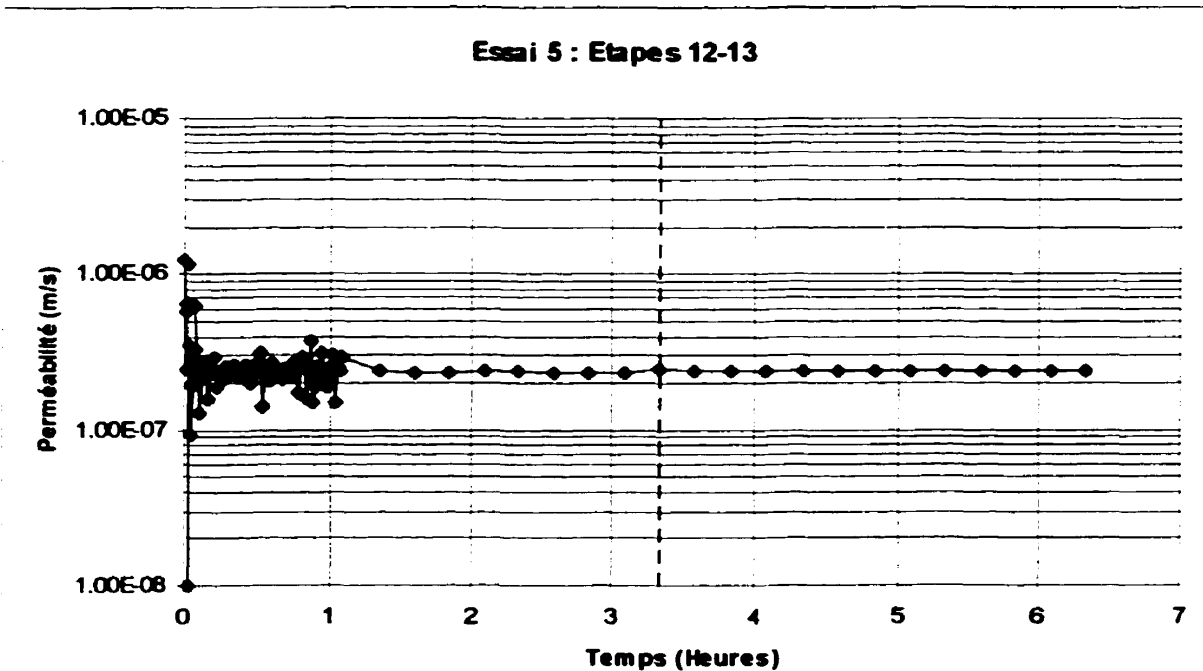


Figure F-6 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 12 et 13

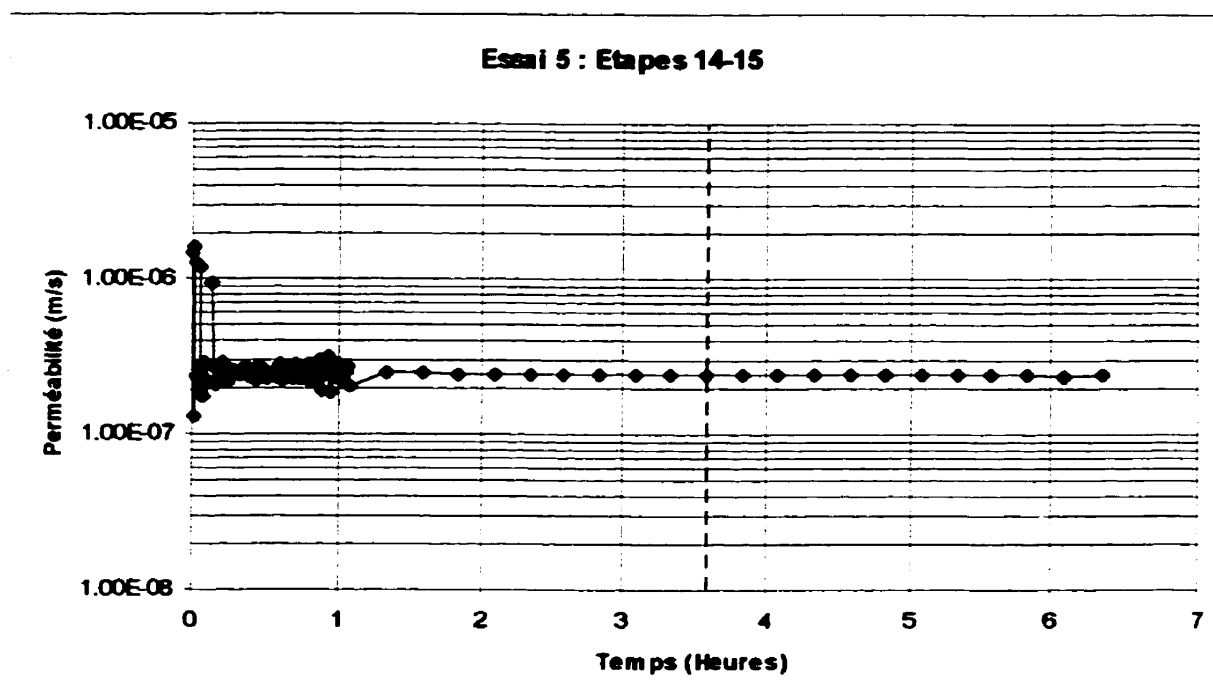


Figure F-7 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 14 et 15

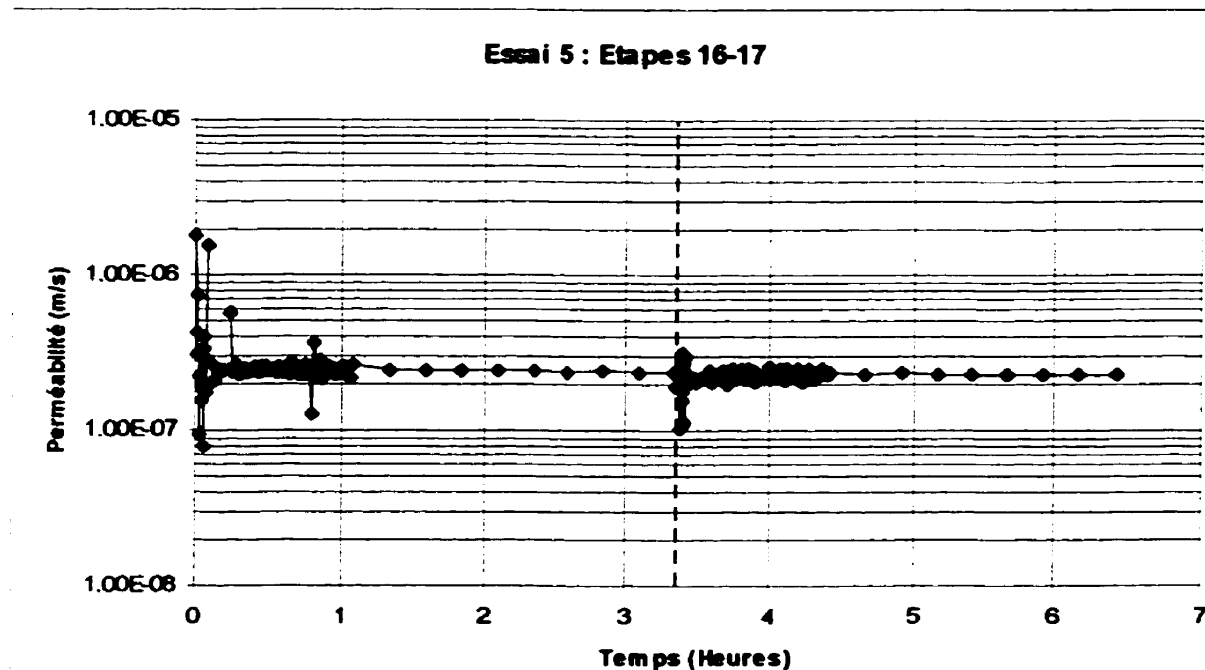


Figure F-8 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 16 et 17

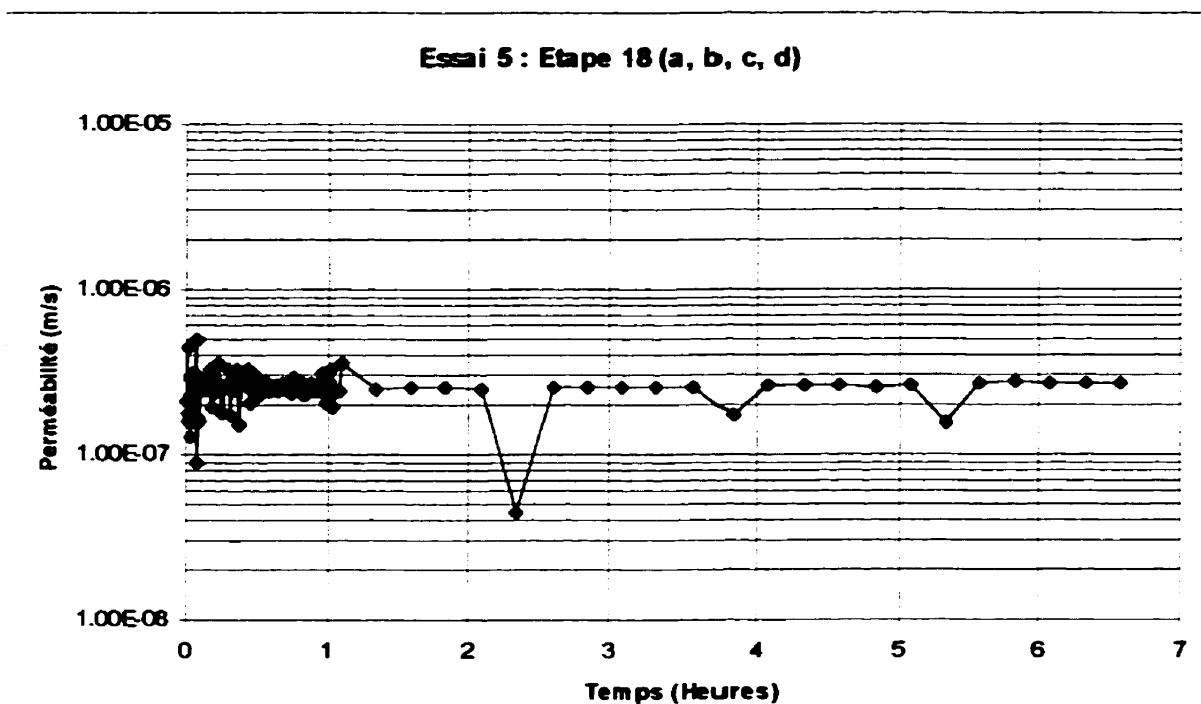


Figure F-9 : Variation de la perméabilité globale lors des étapes 18 a, b, c et d

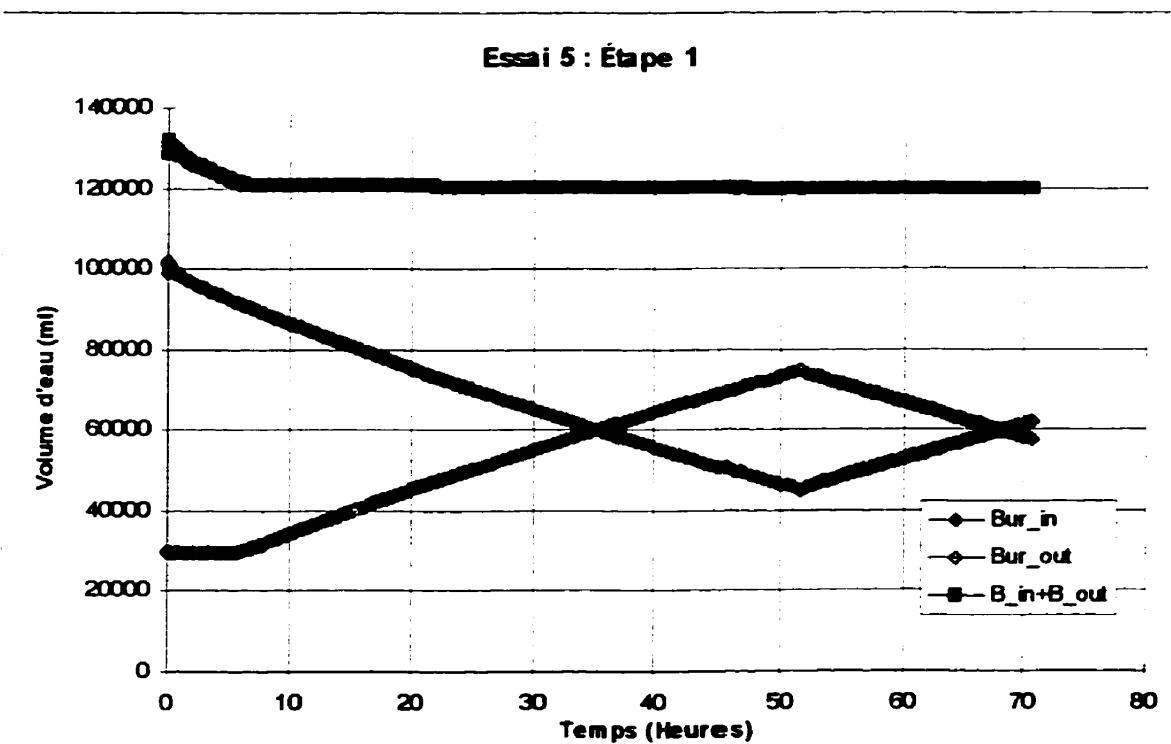


Figure F-10 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 1

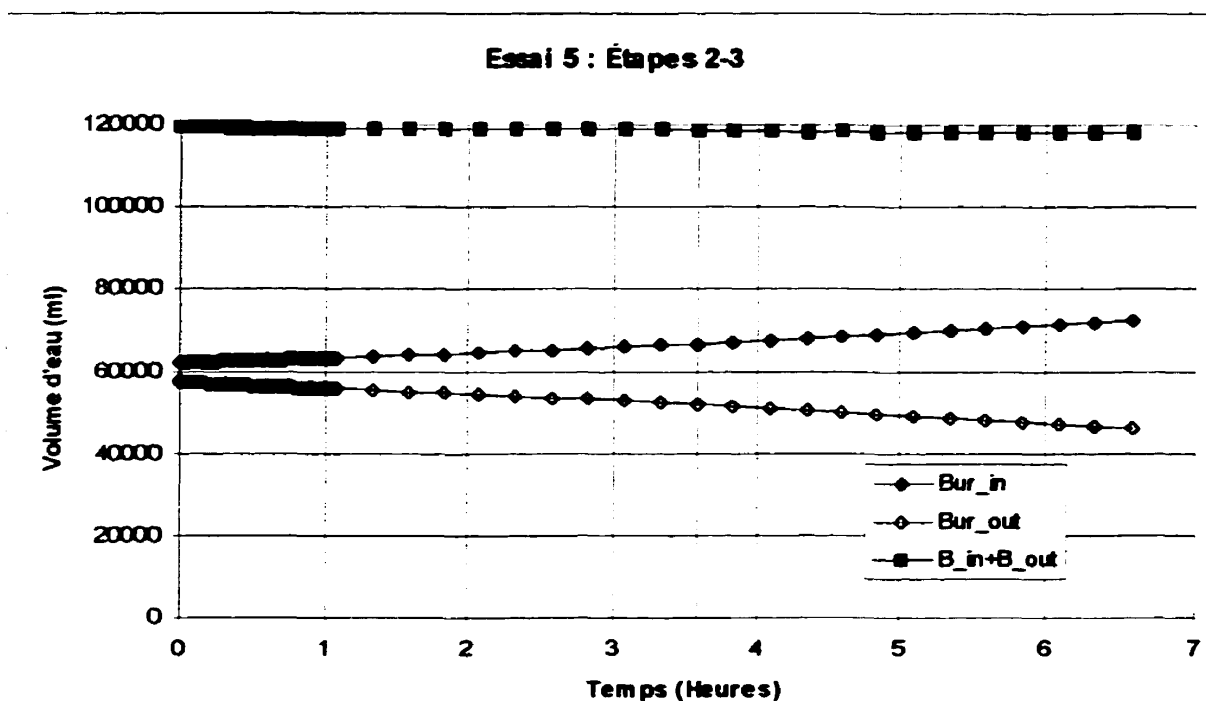


Figure F-11 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 2 et 3

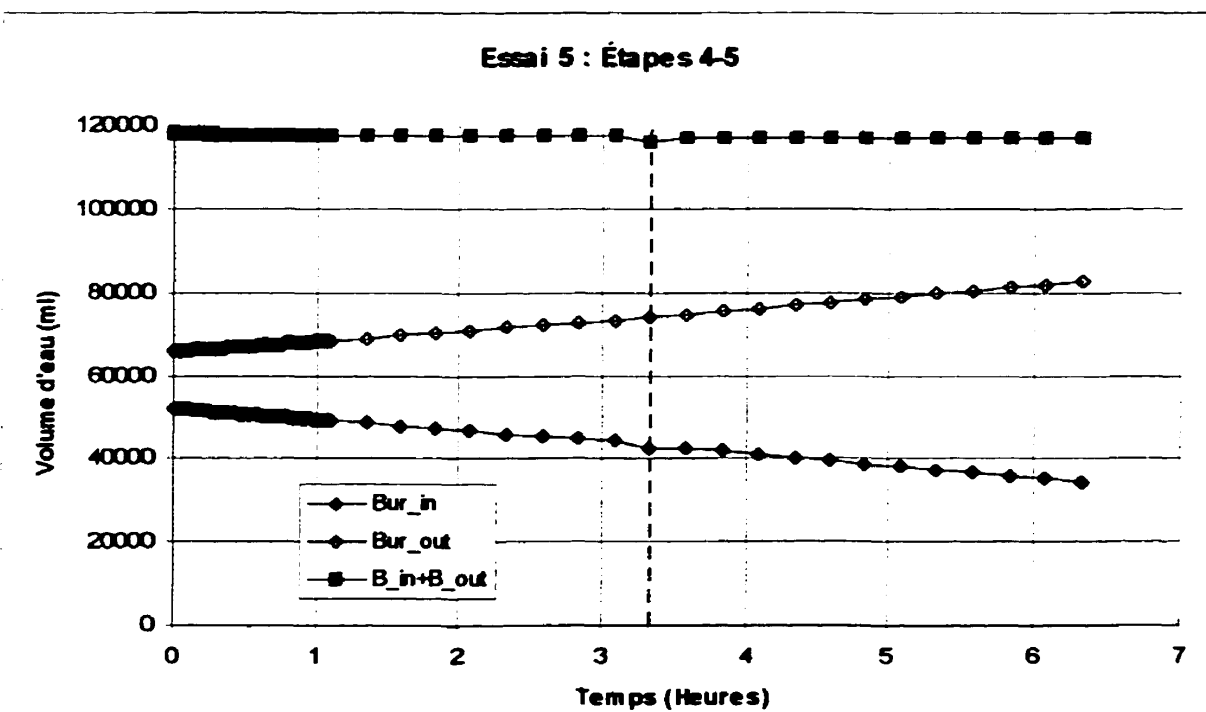


Figure F-12 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 4 et 5

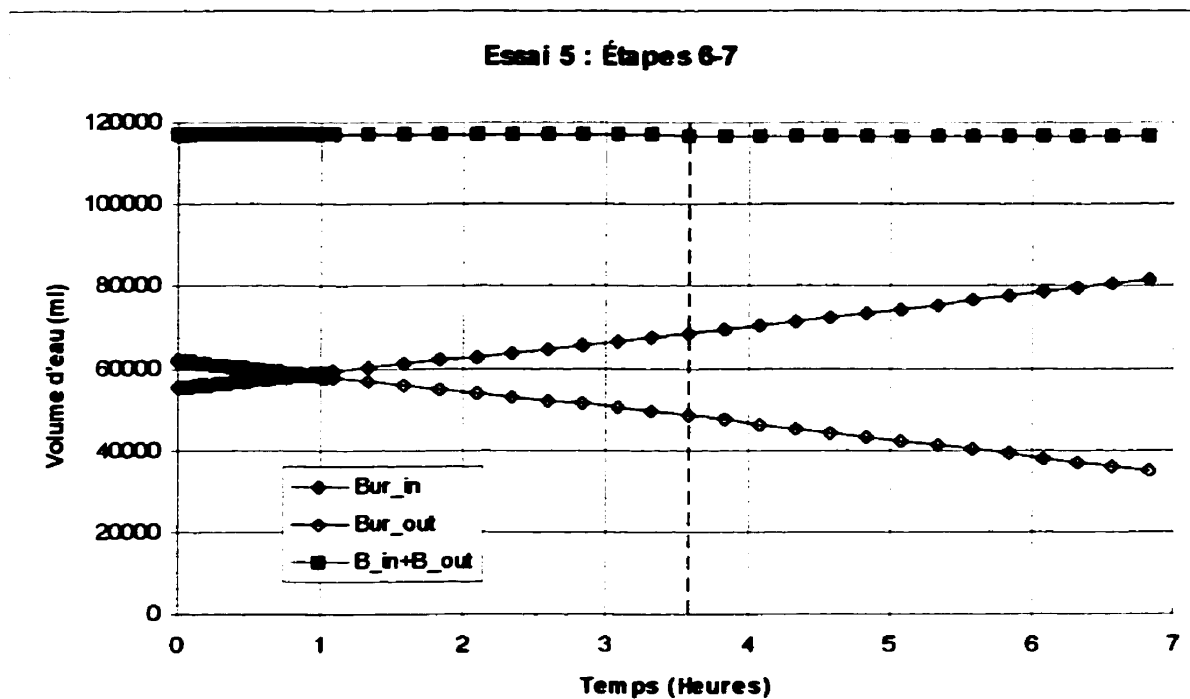


Figure F-13 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 6 et 7

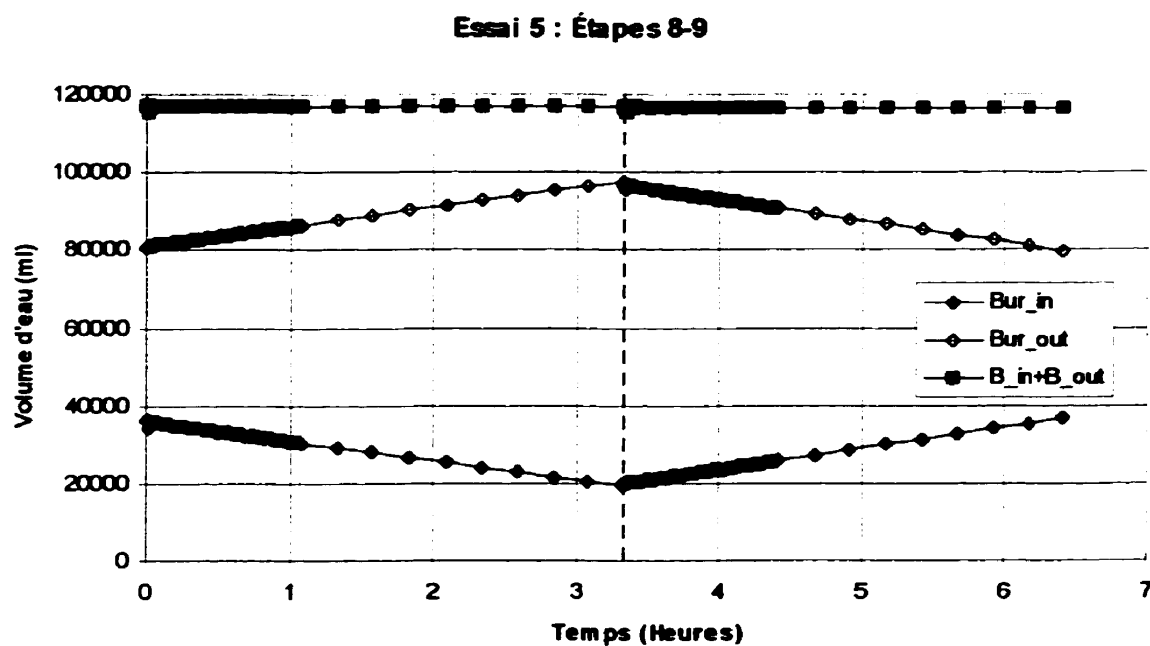


Figure F-14 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 8 et 9

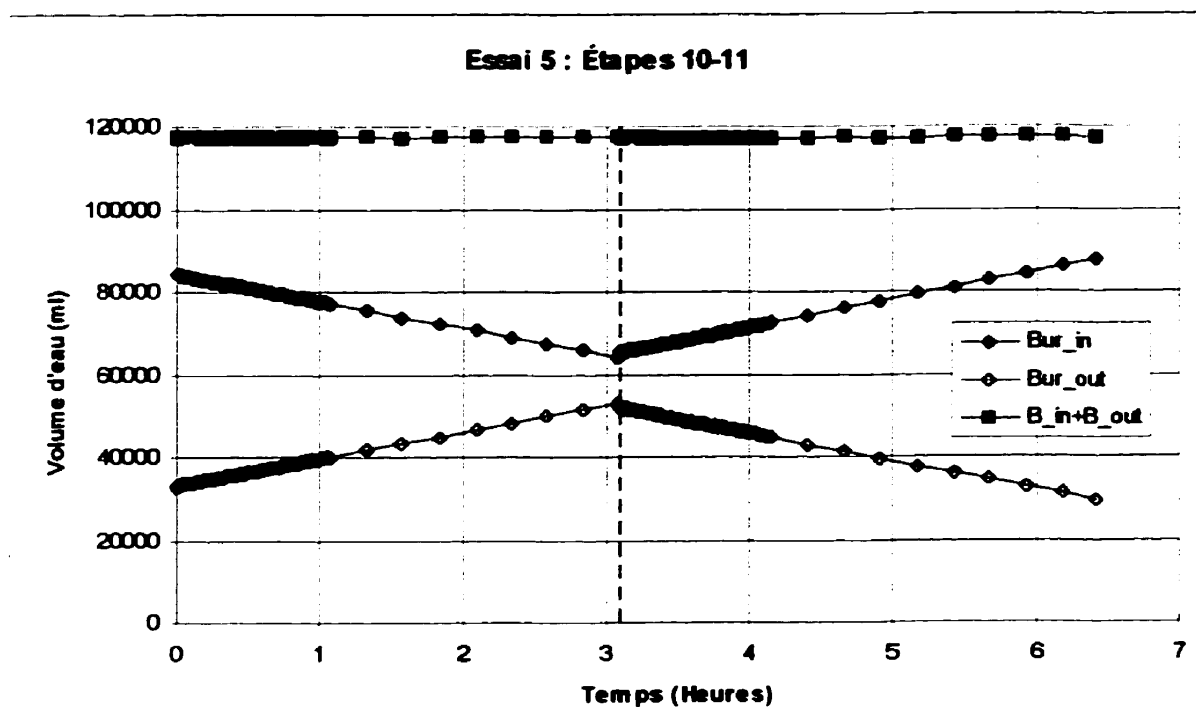


Figure F-15 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 10 et 11

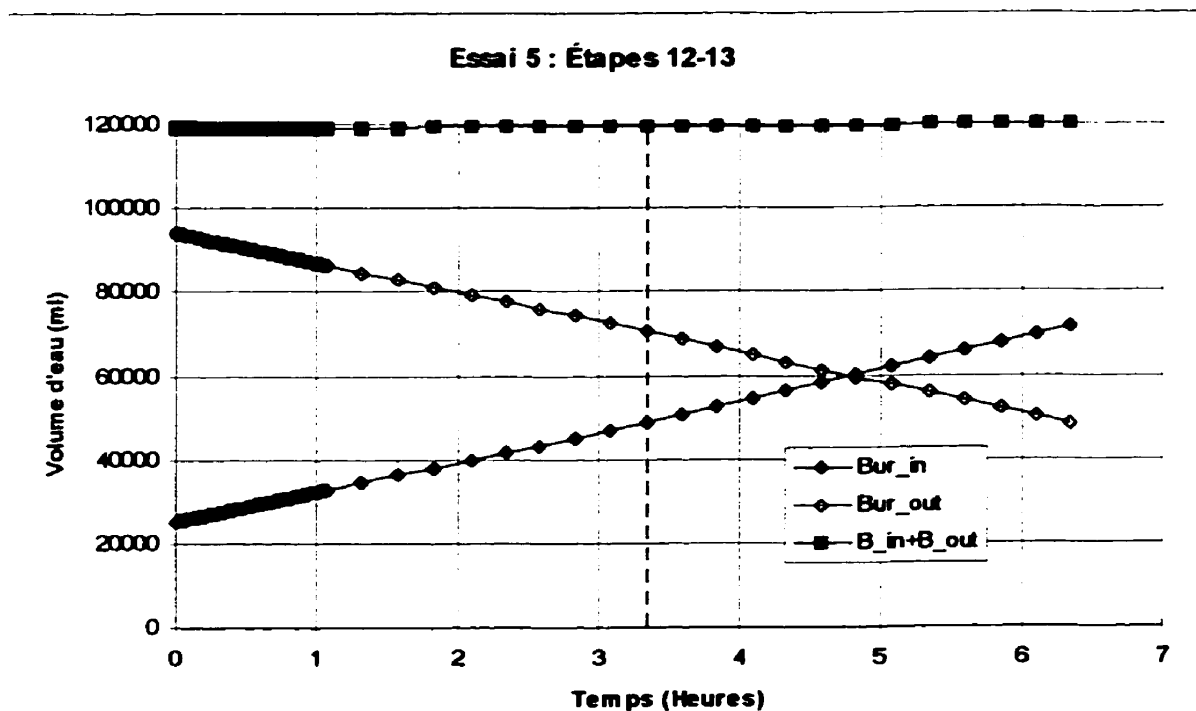


Figure F-16 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 12 et 13

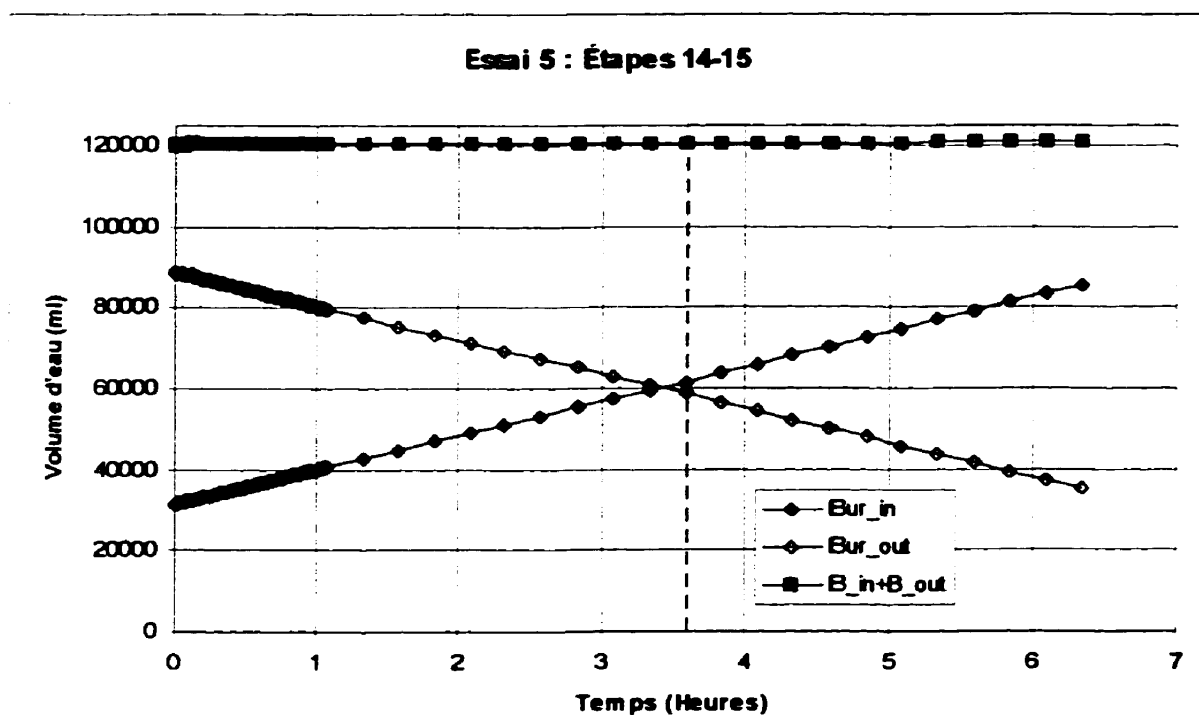


Figure F-17 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 14 et 15

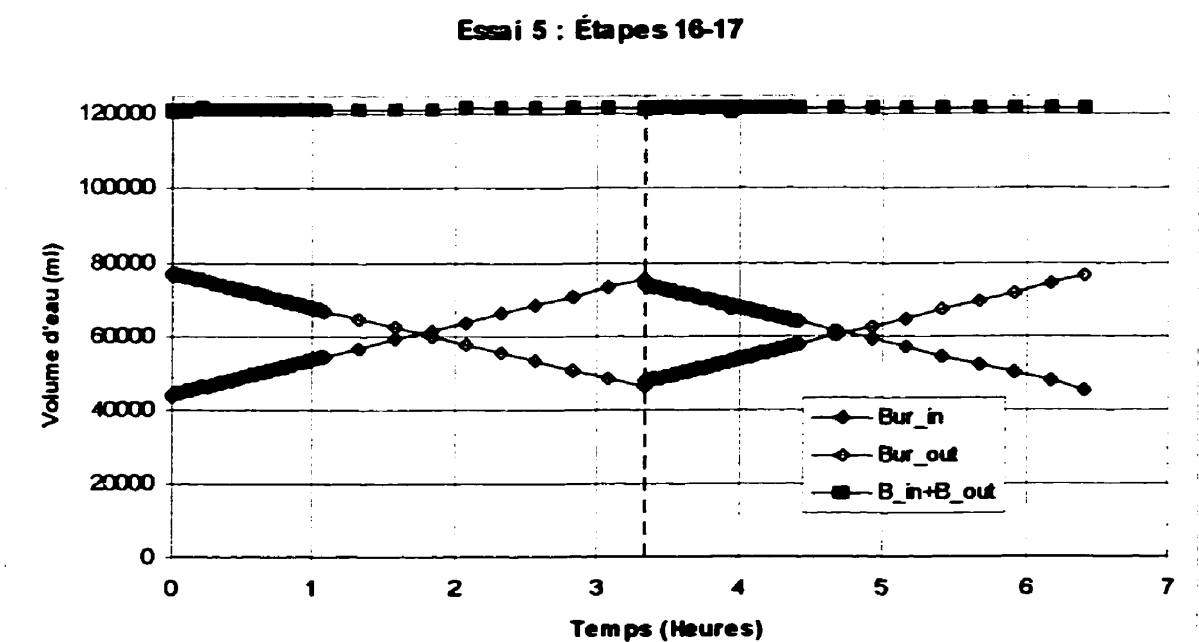


Figure F-18 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors des étapes 16 et 17

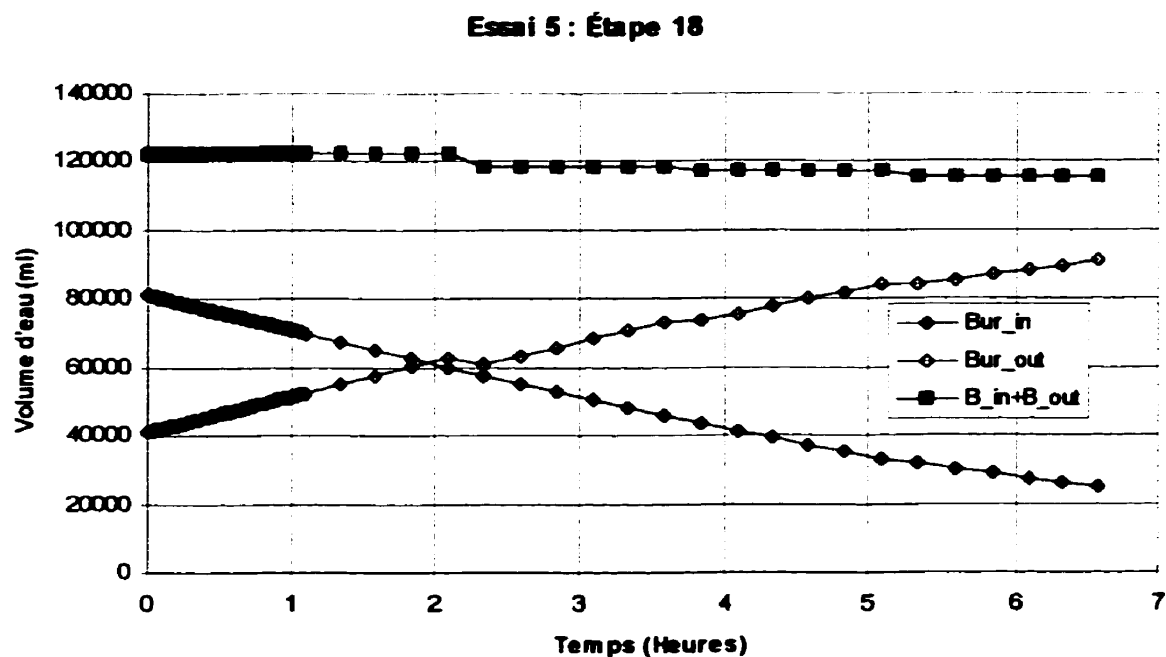


Figure F-19 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 18

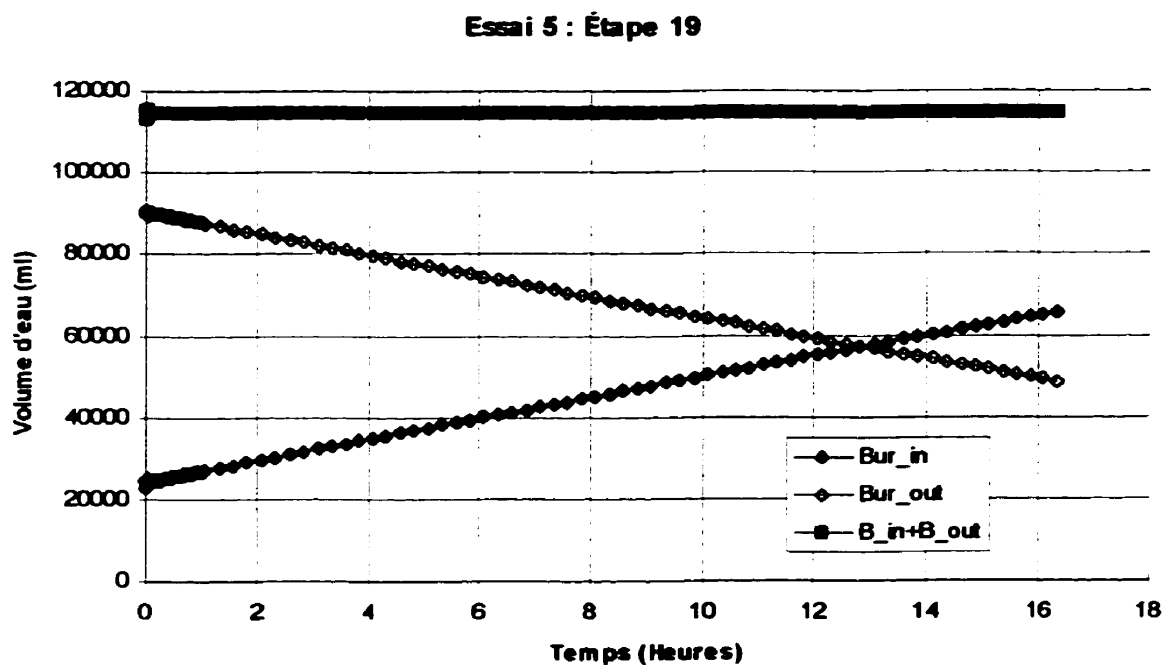


Figure F-20 : Variation des volumes d'eau dans les burettes lors de l'étape 19

ANNEXE G

**Potentiel suffosif des bases selon
Kenney et Lau (1986)**

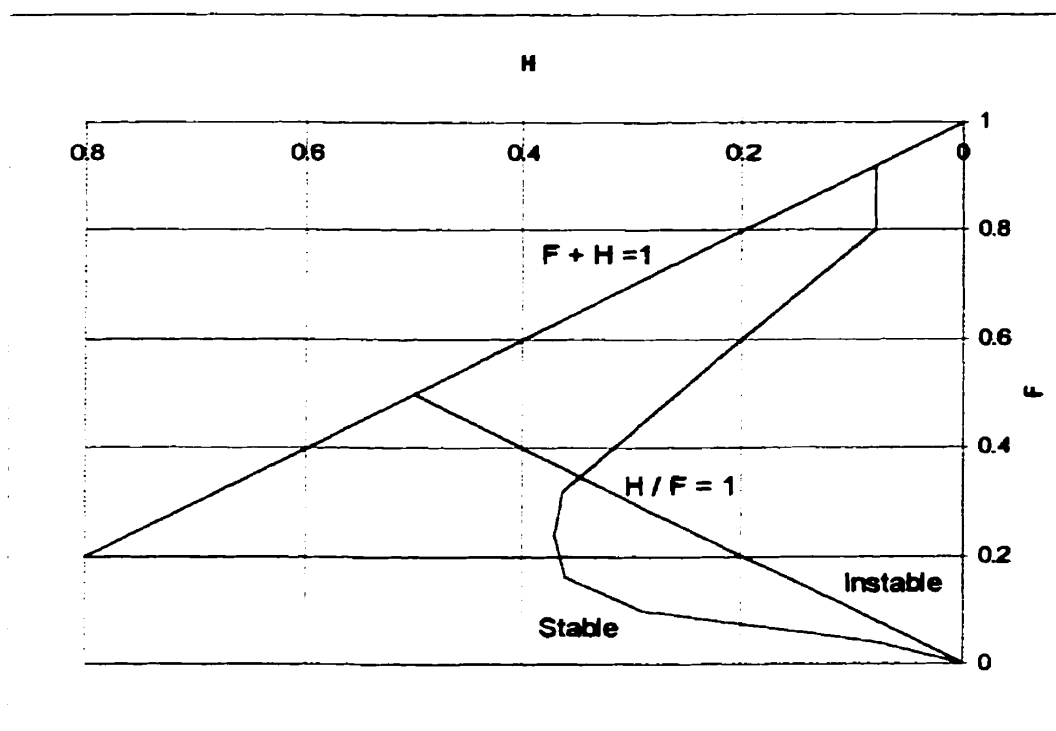


Figure G-1 : Potentiel suffosif de la moraine à 12 % de fines, selon Kenney et Lau (1986)

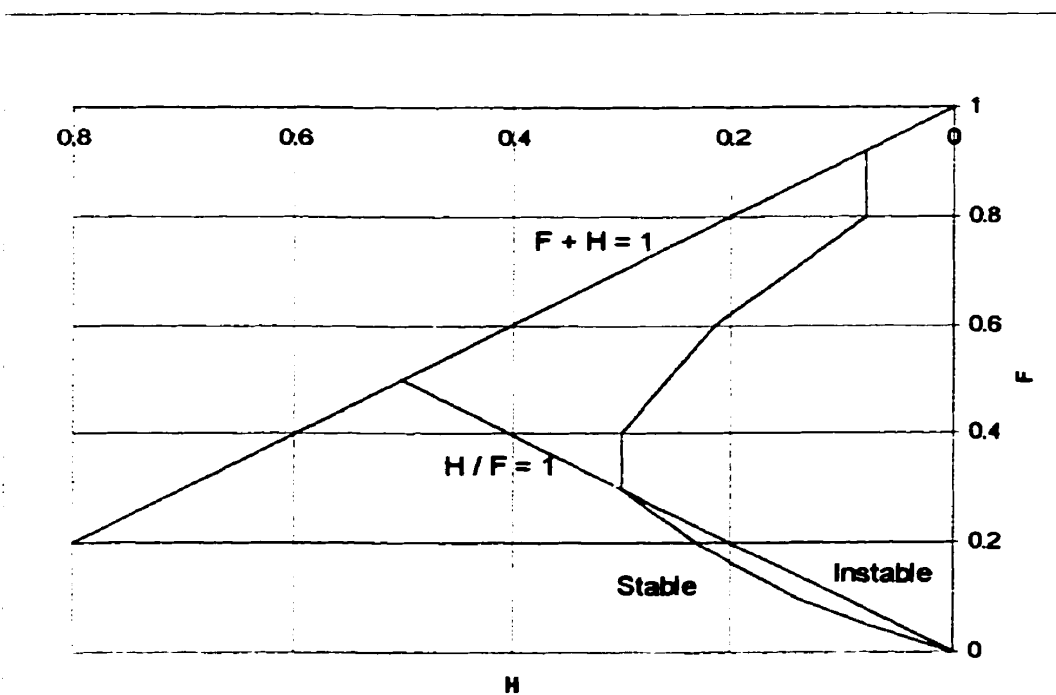


Figure G-2 : Potentiel suffosif de la moraine naturelle, selon Kenney et Lau (1986)